



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO DE LA FORMACIÓN UMIR Y SU POTENCIAL DE GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS EN LA REGIÓN NORTE DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.

JOSÉ ANTONIO MAHAN GAVIRIA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2019

MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO DE LA FORMACIÓN UMIR Y SU POTENCIAL DE GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS EN LA REGIÓN NORTE DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.

JOSÉ ANTONIO MAHAN GAVIRIA

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería – Recursos Minerales

Director:

Profesor Luis Hernán Sánchez Arredondo


Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2019

MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO DE LA FORMACIÓN UMIR Y SU POTENCIAL DE GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS EN LA REGIÓN NORTE DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	PROCESO: LOGÍSTICA ACTIVIDADES ACADÉMICAS	Código: En revisión.
	FORMATO: GUÍA EVALUACIÓN Y OBSERVACIONES TRABAJO FINAL	Versión: 0 Página: 1 de 1

Nombre del Jurado	Astrid Blandón Montes
Cédula o Pasaporte	42968477
Institución	Universidad Nacional de Colombia

Fecha	Septiembre 27 de 2019
Nombre del Estudiante	José Antonio Mahan Gaviria
Título del Trabajo Evaluado	Modelo geológico - geofísico de la Formación Umir y su potencial de generación de hidrocarburos en la región Norte del Valle Medio del Magdalena.

COMENTARIOS Y OBSERVACIONES
En el presente trabajo se investigó y procesó una gran cantidad de información que servirá de base para nuevos trabajos de investigación en la cuenca del Medio Magdalena. Se destaca el interés del autor por abarcar gran cantidad de técnicas de estudio que permiten entender de una manera sencilla algunos conceptos bastante complejos, lo que hace suponer el vasto conocimiento que este tiene sobre los temas expuestos.

Se aprueba: atendiendo eventuales recomendaciones mínimas para la mejora de la calidad del informe, sin necesidad de una nueva reevaluación.	Distinción Meritoria: el jurado evaluador considera que el trabajo presenta un nivel de calidad excepcional.	X
Debe realizar correcciones: aprobación sujeta a cambios que puedan ser realizados en un periodo inferior a 3 semanas.	No se aprueba: considera que el trabajo no cumple con los criterios de un Trabajo Final de Maestría y su modificación podría tardar más de 3 semanas.	

Firma: 

Carrera 80 No. 65-223
Bosque Medellín 103
Teléfono: 4250028
Medellín, Colombia
Fmvalmed-med@unal.edu.co
Patrimonio
de todos
los colombianos

Aprobado por:

Profesor Luis Hernán Sánchez Arredondo (Director)

Profesora Astrid Blandón Montes (Jurado)

Medellín, Agosto de 2019.

José Antonio Mahan Gaviria - Candidato a Magíster en Ingeniería – Recursos Minerales

Dedicatoria

*A la gran familia, a mi esposa amada, a mi madre hermosa por lo que todo soy, a los grandes amigos y a mis hijos **Isabela y Emiliano**, por los que todo puedo.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director, Luis Hernán Sánchez Arredondo, MSc., docente de la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, por su excelente disposición, orientación, colaboración y grandes conocimientos, cuyos valiosos aportes permitieron llevar a cabo este proyecto.

Al Servicio Geológico Colombiano, SGC, Especialmente a Mario Andrés Cuellar, MSc. y PhD, por su apoyo y asesoría académica, además por suministrar y permitir el uso de la información geológica y geofísica utilizada en la realización de este trabajo.

A la compañía Schlumberger por el licenciamiento académico y soporte Onsite, sobre las aplicaciones petrotécnicas empleadas en las fases de carga, interpretación y modelado geológico y geofísico de este estudio.

A la Geóloga Leidy Dayana Niz V., por su contribución en la fase de carga de datos e información sísmica y de pozos sobre los interactivos petrotécnicos.

Al Ingeniero de Petróleos Eider Niz-Velásquez. MSc. y PhD, por sus aportes y contribuciones en la fase de los análisis petrofísicos de los pozos incluidos en esta investigación.

Al Ingeniero Robinson Quintana, MSc. y PhD. (c), por su orientación académica y soporte técnico en el modelado geofísico y geológico del área de estudio.

Al Geólogo René Alberto Vásquez Rodríguez (Lucas), por sus aportes técnicos y valiosas revisiones y correcciones que afinaron la calidad y claridad del informe final. También a la Geóloga Fanny Johanna Villamizar, MSc., por su invaluable tiempo y apoyo en la fase de interpretación sismoestratigráfica y en la orientación para la mejor estructuración del estudio.

A mi familia y a mis hijos, a los grandes amigos por su apoyo y energía, y a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron al desarrollo y la culminación de este trabajo. A todos mil gracias.

Resumen

Este informe reúne los productos obtenidos con la construcción de un modelo Geológico y Geofísico, que integra a la Formación Umir y otras unidades cretácicas del Sector Centro – Norte del Valle Medio del Magdalena (VMM), a partir de la información de sísmica de reflexión y de geología (cartografía y registros de pozo), incluyendo datos de materia orgánica (TOC%, Ro% y Macerales), así como de otra información conexa de interés, que permitió ampliar el conocimiento de esta zona del País.

La metodología utilizada consistió en la incorporación de secciones sísmicas y de registros eléctricos de pozo, a la cartografía y trabajos existentes; dando lugar a la creación de un proyecto de interpretación en una plataforma petrotécnica, que incluyó la carga de datos y ajuste al Datum de la información de la cuenca VMM. Con esta información se crearon las transectas, sobre las cuales se realizaron las interpretaciones sismo-estratigráficas y estructurales para el modelado, que permitieron aportar al conocimiento geológico del Sector Centro – Norte de la cuenca.

La información de pozos fue útil para caracterizar intervalos productores, aplicando la metodología de Pickett Plot. Mediante la estratigrafía de secuencias, se caracterizaron los ambientes y las formaciones litoestratigráficas presentes; finalmente, se incorporaron los datos de geoquímica orgánica para demostrar que la Formación Umir es potencial generadora de hidrocarburos convencionales y no convencionales.

Palabras clave: Modelo geológico/geofísico, hidrocarburos convencionales y no convencionales, Formación Umir, Macerales, Reflectancia de la vitrinita, Análisis petrofísicos, VMM.

Abstract

This report gathers the products obtained with the construction of a Geological and Geophysical model, which integrates the Umir Formation and other cretaceous units of the central-north sector of the Middle Valley of Magdalena (MVM), based on the seismic reflection information and of geology (cartography and well logging), including organic matter data (TOC%, Ro% and Macerals), as well as other related information of interest, which allowed to expand knowledge of this area of the Country.

The methodology used consisted of the incorporation of seismic sections and electrical well logs, to the cartography and existing works; leading to the creation of an interpretation project on a petrotechnical platform, which included the loading of data and adjustment to the information Datum of the MVM basin. With this information the composites were created, on which the earthquake-stratigraphic and structural interpretations for the modeling were made, which allowed to contribute to the geological knowledge of the central-north sector of the basin.

Well information was useful to characterize producer intervals, applying the Pickett Plot methodology. Through stratigraphy of sequences, the environments and lithostratigraphic formations present were characterized; finally, the organic geochemistry data was incorporated to demonstrate that the Umir Formation is a potential generator of conventional and unconventional hydrocarbons.

Key words: Geological and geophysical model, conventional and unconventional hydrocarbons, Umir Formation, Macerals, Vitrinite Reflectance (Ro %), Petrophysics Analysis, MVM.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Lista de Figuras.....	XI
Lista de Tablas	XVII
Lista de abreviaturas.....	XVIII
1. Introducción	19
1.1 Definición del problema	20
1.2 Justificación	20
1.3 Objetivo general.....	21
1.4 Objetivos específicos	21
1.5 Área de estudio.....	22
1.6 Datos Geológicos y Geofísicos Utilizados	24
1.7 Metodología de Trabajo	26
1.8 Estado del Arte	28
2. Marco Tectónico.....	31
3. Marco Geológico Regional	36
3.1 Transectas Regionales.....	44
3.2 Estratigrafía del Sector Centro-Norte del VMM.....	53
3.2.1 Formación Bocas	54
3.2.2 Formación Noreán.....	54
3.2.3 Formación Rosablanca.....	54
3.2.4 Formación Paja	54
3.2.5 Formación Tablazo.....	55
3.2.6 Formación Simití	55
3.2.7 Formación Calizas del Salto	55
3.2.8 Formación La Luna.....	55
3.2.9 Formación Umir	56

3.2.10 Formación Lisama	57
3.2.11 Formación La Paz	58
3.2.12 Formación Esmeraldas	58
3.2.13 Formación Mugrosa	58
3.2.14 Formación Colorado	59
3.2.15 Grupo Real	59
3.2.16 Grupo Mesa	59
3.2.17 Depósitos Cuaternarios	60
4. Marco teórico	63
4.1 Interpretación Geológica y Sismoestratigráfica	63
4.1.1 Espesores Formación Umir por Pozo	70
4.2 Estratigrafía de Secuencias	71
4.3 Atributos Sísmicos	77
4.4 Geoquímica Orgánica	80
5. Resultados	88
5.1 Análisis e Integración de Información Geológica y Geofísica	88
5.2 Interpretación Sismoestratigráfica, Aporte y Refinamiento del Conocimiento de la cuenca VMM	91
5.3 Geoquímica y Materia Orgánica de la Formación Umir	91
5.4 Análisis Petrofísico y Estratigráfico de Pozos	91
5.4.1 Pozo ANH-VMM LA PISTA-1X	94
5.5 Estratigrafía Sísmica	101
5.5.1 Secuencia A	102
5.5.2 Secuencia B	104
5.5.3 Secuencia C	106
5.6 Integración y Análisis de Resultados	106
5.6.1 Principales Horizontes Interpretados	107
6. Conclusiones	114
7. Recomendaciones	115
8. Anexos	116
1. Concordancia entre el Mapa de Gradiente geotérmico, el mapa de profundidad de basamento Cretácico y profundidad de sismicidad.	117
2. Listado de pozos del VMM utilizados en este trabajo de maestría	119
3. Informe de espesores de las formaciones Mesozoicas y Cenozoicas del Sector Centro - Norte del VMM	123
Bibliografía	124

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1-1 Ubicación geográfica del Valle Medio del Magdalena (VMM), y Relación de las planchas geológicas utilizadas para el estudio y ubicación del área de estudio	22
Figura 1-2 Mapa geológico y corte A -A'-A"	23
Figura 1-3 Mapas (Shape) de localización de información sísmica 2D/3D y pozos existentes para el VMM.	25
Figura 1-4 Secuencia metodológica propuesta para el proyecto.	28
Figura 2-1 Evolución tectónica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena con motor lejano de deformación.	32
Figura 2-2 Evolución tectónica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, con motor de deformación por colisión.	32
Figura 2-3 Esquema del Norte de los Andes.	33
Figura 2-4 Mapa Tectónico actualizado del Sector Centro - Norte del VMM.	35
Figura 3-1 Mapa tectono-estructural que incluye el área de estudio.	37
Figura 3-2 Resumen de eventos tectono-estratigráficos desarrollados en el VMM.	38
Figura 3-3 Evolución del Valle Medio del Magdalena a través de una cuenca extensional.	41

Figura 3-4 Evolución tectónica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.	41
Figura 3-5 Mapa geológico actualizado del Sector Centro – Norte del Valle Medio del Magdalena.	42
Figura 3-6 Transectas definidas (líneas color naranja 1-8) al Centro y Norte del VMM.	43
Figura 3-7 Perfil 1. Es la sección que se encuentra más al sur, en el costado suroriental se encuentra el sistema de fallas de La Salina.	44
Figura 3-8 Perfil 2. Esta sección está compuesta por la línea sísmica ANH-TR-2006-04A.	45
Figura 3-9 Perfil 3. Sección norte que muestra el Sinclinal de Nuevo Mundo.	46
Figura 3-10 Perfil 4. Esta transecta tuvo un cubrimiento de líneas sísmicas 2D limitado, en la región centro oriental se incorpora la línea SPR-1997-1250, que cubre un segmento del sinclinal de Nuevo Mundo, para lo demás, la interpretación de esta región fue establecida en su momento con base en la geología de superficie.	48
Figura 3-11 Perfil 5. El perfil cubre 152 Km lineales. En la región central se encuentra el alto de basamento pre-Cretácico Cagüí; afloran también algunas formaciones Jurásicas. Para el ajuste de esta transecta, se proyectaron los pozos San Alberto-1 y Toca-1.	48
Figura 3-12 Perfil 6. Cuenta con orientación NW-SE y tiene una longitud de 152 Km, es el que se encuentra más al norte de la zona investigada por el SGC en 2016; el costado Este de esta transecta, se encuentra sobre la Cordillera Oriental y no tenía cubrimiento sísmico 2D, por lo que fue necesario utilizar la información cartográfica de superficie. Sobre este perfil fueron proyectados los pozos Trigos-1, Alamo-1, Totumal-1 y Reses-1.	49
Figura 3-13 Perfil 7. Es la sección regional con mayor cubrimiento longitudinal en dirección SW-NE, posee una longitud de 239 Km, su costado nororiental finaliza en la Cordillera Oriental más allá de las Fallas de Algodonal. Sobre esta sección fue proyectado el pozo Punta Piedra-2.	50

Figura 3-14 Perfil 8. Este perfil tiene orientación longitudinal N-S de 148 Km, las líneas punteadas que se observan en la sección, principalmente en la zona sur del perfil (línea del límite de información), corresponde a la interpretación resultante de la extrapolación de los puntos de intercepción con las líneas sísmicas adyacentes. 52

Figura 3-15 Cronoestratigrafía de la cuenca del VMM mostrando las principales secuencias tectono-estratigráficas y las fases de deformación. 61

Figura 3-16 Columna estratigráfica actualizada del sector norte del Valle Medio del Magdalena. El cambio de sedimentación continental en el Jurásico a marino en el Cretácico y luego de marino en el Cretácico a continental en el Cenozoico, implicó cambios relativos del nivel del mar que son relacionables con la actividad tectónica regional. 62

Figura 4-1 Construcción del sismograma sintético para el amarre sísmico de la línea PP-1979-12 con el Pozo Helios-1. 64

Figura 4-2 Construcción del sismograma sintético para el amarre sísmico de la línea PP-1979-12 con el Pozo Helios-1, cerca de Bajos de Campamento, límites Santander-Antioquia. 65

Figura 4-3 Ubicación geográfica de la línea regional Trasandina 2006 No. 04A (línea resaltada en color amarilla), sector Oriental del Valle Medio del Magdalena, VMM. Sobre la sección sísmica se observa el Sinclinal de Nuevo Mundo, La Discordancia del Eoceno y las mega-secuencias del Mesozoico y el Cenozoico 65

Figura 4-4 Sección de la línea regional ANH TR-2006-04A, donde se observa el Sinclinal de Nuevo Mundo y la interpretación de parte de la secuencia estratigráfica Mesozoica y Cenozoica. 66

Figura 4-5 Sección ampliada de la línea regional Trasandina 2006, ANH TR-2006-04A, donde se observa el Sinclinal de Nuevo Mundo y una interpretación de una parte de la secuencia estratigráfica Mesozoica y Cenozoica. El espesor de la Formación Umir en este punto, es de aproximadamente 1000 metros. 67

Figura 4-6 Sobre la línea sísmica B-1989-1700, se observan las reflexiones en paquetes tabulares, propios de ambientes marinos, por debajo de la secuencia del Cretáceo Basal (SB1), las estructuras pueden corresponder a secuencias de depósitos Triásico-Jurásico

depositadas durante las etapas de apertura de la cuenca. Igualmente se observan las geometrías tabulares (ambientes marinos), de la secuencia calcárea del Cretáceo (Formaciones Umir, La Luna y Tablazo) que truncan en Toplap contra la Discordancia del Eoceno Inferior (SB2) en color anaranjado. 68

Figura 4-7 Sobre la línea sísmica AG-1979-21 (Programa Aguachica-79), se observan las reflexiones en paquetes tabulares, propios de ambientes marinos de la secuencia calcárea del Cretáceo (Formaciones Umir, La Luna, Simití y Tablazo) que truncan en Toplap contra la Discordancia del Eoceno medio (SB2) en color anaranjado. 69

Figura 4-8 Sobre transecta construida con líneas del Programa Aguachica-79, se observan las reflexiones en paquetes tabulares, propios de ambientes marinos de la secuencia Cretácica (Formaciones Umir, La Luna, Simití y Tablazo) que truncan en Toplap contra la Discordancia del Eoceno medio (SB2) en color anaranjado. 70

Figura 4-9 Esquema representativo del concepto de estratigrafía de secuencias, la figura superior presenta el concepto de nivel base. 72

Figura 4-10 Secuencias deposicionales y sistemas de tractos o pasajes. 73

Figura 4-11 Diagrama de las diferentes terminaciones de los reflectores sísmicos y sus respectivos nombres. 74

Figura 4-12 Determinación de continuidad, amplitud, y frecuencia de las reflexiones sísmicas. 75

Figura 4-13 Sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C y tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas AB/C. 75

Figura 4-14 Características faciales para ambientes de deposición clásticos en un escenario de plataforma. 76

Figura 4-15 Clasificación de los atributos sísmicos. 78

Figura 4-16 Palinofacies de las Formaciones La Luna y Umir. En secciones delgadas, A y B: Con luz normal transmitida; A' y B' con luz fluorescente reflejada. Alg: Alginita, AOM: Materia Orgánica Amorfa, Cu: Cutículas, Pg: Granos de Polen, Re: Resinas. 81

Figura 4-17 Palinofacies de las Formaciones La Luna y Umir. En secciones delgadas, A y B: Con luz normal transmitida; A' y B' con luz fluorescente reflejada. Alg: Alginita, AOM: 82
Materia Orgánica Amorfa, Cu: Cutículas, GP: Granos de Polen, Re: Resinas.

Figura 4-18 Distribución de los esteranos (20R C 20S) C27, C28, C29 y el gráfico cruzado de pristano / n-C17 vs. Fitano / n-C18. 83

Figura 4-19 Localización de la sección de la Quebrada Mata de Cacao, ubicación de las Formaciones Umir, La Luna y los campos Santos, Suerte y San Luis, Cuenca del Valle Medio del Magdalena. 84

Figura 4-20 Ubicación y distribución de la Formación Umir como potencial de CBM en el bloque CBM-VMM-01 del Valle Medio del Magdalena. 85

Figura 4-21 Mapa de variación de TOC% (A) y Ro% (B) para la Formación La Luna que subyace a Umir en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. 86

Figura 4-22 Estudio comparativo de las distribuciones y perfiles de biomarcadores n- and i-alkanos entre extractos de La Fm Umir (miembro medio) y el Crudo del campo Casabe. 87

Figura 5-1 Información geológica y geofísica existente en el Valle Medio del Magdalena, de acuerdo al shape actualizado a 2019 del Banco de Información Petrolera (BIP). 89

Figura 5-2 Información geológica y geofísica cargada en la plataforma petrotécnica Petrel para el proyecto de investigación de maestría del Valle Medio del Magdalena, VMM. 90

Figura 5-3 Gráfica de porosidad y determinación de litología a partir de registros de Litho-Densidad y registros de Neutrón compensado (CNL), cruzado Densidad-Neutrón. 92

Figura 5-4 Valores del índice PE para una lista de minerales (Petrophysics M.Sc. Course Notes, Dr. Paul Glover – The Litho-Density log, Universidad de Leeds. 92

Figura 5-5 Ecuación de Archie y Gráfico de Pickett, Niz V. E., Material de Clase “Well Logging and Formation Evaluation”, Universidad de Calgary, 2008. 93

Figura 5-6 Gráfico de Pickett para el intervalo 106-116 ft.	98
Figura 5-7 Tabla de concentración de NaCl-Resistividad/Temperatura, SLB.	100
Figura 5-8 Registros eléctricos que muestran el cambio de litologías sedimentarias a ígneas volcano-sedimentarias (Complejo Real a Formación Noreán).	101
Figura 5-9 Sismofacies T-C/Subp identificada para la Secuencia A, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.	103
Figura 5-10 Sismofacies Tr-C/Ob identificada para la Secuencia B, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.	104
Figura 5-11 Sismofacies Tr-C/Ob identificada para la Secuencia C, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.	105
Figura 5-12 Mapa de profundidad base del Cretácico.	107
Figura 5-13 Mapa en profundidad Fm. La Luna.	108
Figura 5-14 Mapa en profundidad Fm. Umir.	109
Figura 5-15 Mapa en profundidad Discordancia Sub-Eoceno medio.	110
Figura 5-16 Mapa en profundidad del Oligoceno.	111
Figura 5-17 Mapa en profundidad del Mioceno.	112
Figura 5-18 Modelo geológico tridimensional de las Formaciones Umir y La Luna con sus principales fallas en colores rojo y gris.	113
Figura 8-1 Superficies comparativas Mapa de la base del Cretácico (A), Gradiente Geotérmico (B) y Distribución de la profundidad de sismicidad (C).	117
Figura 8-2 Modelo sismotectónico, placa Paleocaribe y discontinuidad de Moho.	118

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Listado de algunos de los pozos exploratorios y estratigráficos del VMM, utilizados en esta investigación.	26
Tabla 2-1 Datos de cubrimiento y orientación transectas regionales VMM.	43
Tabla 3-1 Listado de pozos con espesores de la Formación Umir VMM.	70
Tabla 4-1 Resultados de las características como roca fuente de las Fm. Umir y La Luna	81
Tabla 5-1 Carga de información geológica y sísmica utilizada en el proyecto de maestría.	90
Tabla 6-1 Unidades litoestratigráficas estudiadas al norte del VMM.	96
Tabla 7-1 Intervalos identificados como prospectivos al norte del VMM.	97
Tabla 8-1 Intervalos identificados como prospectivos al norte del VMM.	99

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
Km	Kilómetros
Km ²	Kilómetros cuadrados
SE	Sureste
SW	Suroeste
NE	Noreste
NW	Noroeste
MS	Milisegundos
AAPG	The American Association of Petroleum Geologists
GSA	The Geological Society of America
A/S	Espacio de Acomodación y aporte sedimentos
LST	Tracto de nivel bajo
TST	Tracto de nivel transgresivo
HST	Tracto de nivel alto
SB	Sequence Boundary
TS	Transgressive Surface
MFS	Superficie de Máxima Inundación
FSST	Falling Stage System Track
RST	Tracto de nivel regresivo
TWT	Tiempo doble
2D	Sección sísmica bidimensional
3D	Cubo sísmico tridimensional
Ma	Millones de años
VMM	Valle Medio del Magdalena

1.Introducción

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio representa una de las provincias petroleras más importantes del país. El Valle Medio del Magdalena (VMM), ha sido objeto de numerosos proyectos e investigaciones exploratorias y académicas que han arrojados exitosos descubrimientos hidrocarbúferos para el desarrollo de nuestro territorio. Las actividades exploratorias iniciaron en el año 1916, con la compañía Tropical Oil Company, con el pozo Infantas-1, iniciando su producción comercial hacia el año 1918 con el pozo Infantas-2 (Govea et al, 1986). Desde el punto de vista geocientífico, esta área es muy importante para entender la evolución geológica del norte de la cordillera de los Andes colombianos.

Las geo-estructuras de la cuenca del VMM, presentan una dirección NNE-SSW. El origen de este valle se asocia con la evolución tectónica de las cordilleras Central y Oriental. Ambas se caracterizan por presentar estructuras de tipo piedemonte con vergencia al Oriente y al Occidente respectivamente; así como transpresiones a lo largo de las fallas de Palestina y Santa Marta – Bucaramanga, (ANH, 2014).

Al norte del Valle Medio del Magdalena, se identifican tres estilos estructurales dominantes. Sobre el margen occidental se observan estructuras en flor, características de sistemas transpresivos, que algunas veces se asemejan a fallas inversas. El flanco oriental por otro lado, presenta fallas inversas de bajo ángulo, (tipo thrust). Hacia la parte central de la cuenca, la complejidad estructural es muy leve, evidenciándose estilos compresionales, que han actuado sobre este territorio desde los tiempos de la acreción de la Cordillera Occidental sobre la Cordillera Central, (Mojica et al, 1990).

La secuencia sedimentaria, comprende unidades litoestratigráficas de edad Jurásica hasta depósitos cuaternarios, con una potencia o espesor promedio de unos 8.500 metros (Gómez et al, 2005). Las unidades Jurásicas aflorantes (vía Aguachica-Ocaña), permiten interpretar que se depositaron en una cuenca sin-rift o de origen tensional, que

infrayacen una gran secuencia de rocas que van desde el Cretácico al Paleoceno, las cuales representan ambientes de formación marinos a transicionales y paludales, cuyos sedimentos fueron depositados en una cuenca de margen pasivo, (Clavijo et al, 2008).

En el sector norte del VMM, aunque las campañas exploratorias de la industria petrolera y las investigaciones académicas, han probado la presencia de hidrocarburos convencionales en todas las estructuras de la cuenca, sobre las secuencias cretácicas y terciarias; no ha sido así para los hidrocarburos no convencionales (HNC), cuyas investigaciones recién inician en nuestro país, impulsadas por mayores requerimientos energéticos, los cuales podrían ser satisfechos por este tipo de recursos.

1.1 Definición del problema

Desde el año 1998 algunas compañías privadas han descubierto en la zona de estudio varios yacimientos petrolíferos importantes, entre ellos, la empresa estadounidense Harken en inmediaciones del Municipio de Aguachica, Cesar, perforó el pozo Catalina - 1, el cual produjo cerca de 4.000 barriles diarios de 36 grados API (Ecopetrol, 1998). Más recientemente la multinacional Lewis Energy Group, con sus pozos Buturama al sur del mismo municipio, tienen una producción importante de hidrocarburos, sin embargo, en esta zona del país las investigaciones de potencialidad de generación de hidrocarburos y el estudio de la materia orgánica para recursos no convencionales de sucesión cretácica, entre ellas la Formación Umir, son todavía muy incipientes y la poca que pueda existir pertenece a empresas privadas, la cual es muchas veces subutilizada y poco accesible a la investigación científica, debido a que estos datos e información exploratoria obtenida en la perforación de los pozos y en los programas de adquisición sísmica 2D/3D, es priorizada casi exclusivamente para beneficio económico de los recursos energéticos y escasamente compartida para las investigaciones académicas.

1.2 Justificación

El trabajo propuesto para esta investigación de maestría, profundizará y afinará el conocimiento geológico, geofísico y geoquímico de la Formación Umir en el Sector Norte del Valle Medio del Magdalena, VMM, aportando al futuro desarrollo energético y económico de los recursos hidrocarburíferos del país.

Existe un gran desconocimiento sobre la disposición de estas unidades estratigráficas, lograr comprender y refinar la geometría, la extensión, polaridad, la profundidad y las características estructurales de la Formación Umir y demás unidades cretácicas subyacentes y suprayacentes, hacen pertinente y necesario iniciar este tipo de estudios académicos (Figura 1-1).

1.3 Objetivo general

Realizar un modelo geológico y geofísico, integrando la Formación Umir en el Sector Norte del VMM en inmediaciones a los municipios de Aguachica, Gamarra y Morales a partir de la información de secciones sísmicas 2D, cubos 3D, registros de pozo y de los datos de materia orgánica y macerales disponibles para la zona de estudio.

1.4 Objetivos específicos

- Analizar e integrar los datos geológicos de pozos exploratorios y productivos, y de los programas geofísicos 2D/3D existentes y que se encuentren disponibles de la región norte del VMM, para la interpretación de las unidades estratigráficas cretácicas presentes en la zona de interés.
- Describir y de ser posible refinar el componente geológico, tectónico y estructural de la zona de estudio, utilizando la información de las exploraciones geológicas de superficie, la información de los registros de pozos y la interpretación de las secciones sísmicas 2D/3D existentes y disponibles.
- Estimar las profundidades de la Formación Umir, con el propósito de identificar cuáles son las zonas con mayor madurez de Materia Orgánica (MO).
- Con la información de Materia Orgánica obtenida de los pozos exploratorios, definir las facies orgánicas de la Formación Umir para el área de estudio.
- Estimar, las zonas de petróleo y gas para precisar los intervalos de mayor potencialidad hidrocarburífera, con base en las corridas de los registros y gráficos compuestos de al menos uno de los pozos disponibles.

1.5 Área de estudio

El área de estudio está localizada al norte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), al sur del Departamento del Cesar, Colombia, específicamente sobre la plancha geológica No. 75 - Aguachica que incluye entre otros los municipios de Aguachica, Gamarra y Morales, a una distancia aproximada de 593 Km de la ciudad de Bogotá y 466 Km de la ciudad de Medellín; delimitada geográficamente al Oeste, por la Serranía de San Lucas y al Oeste por la Cordillera Oriental. Cuya ubicación está dada en el sistema geográfico de referenciación Magna Bogotá (Figura 1-1 y 1-2).

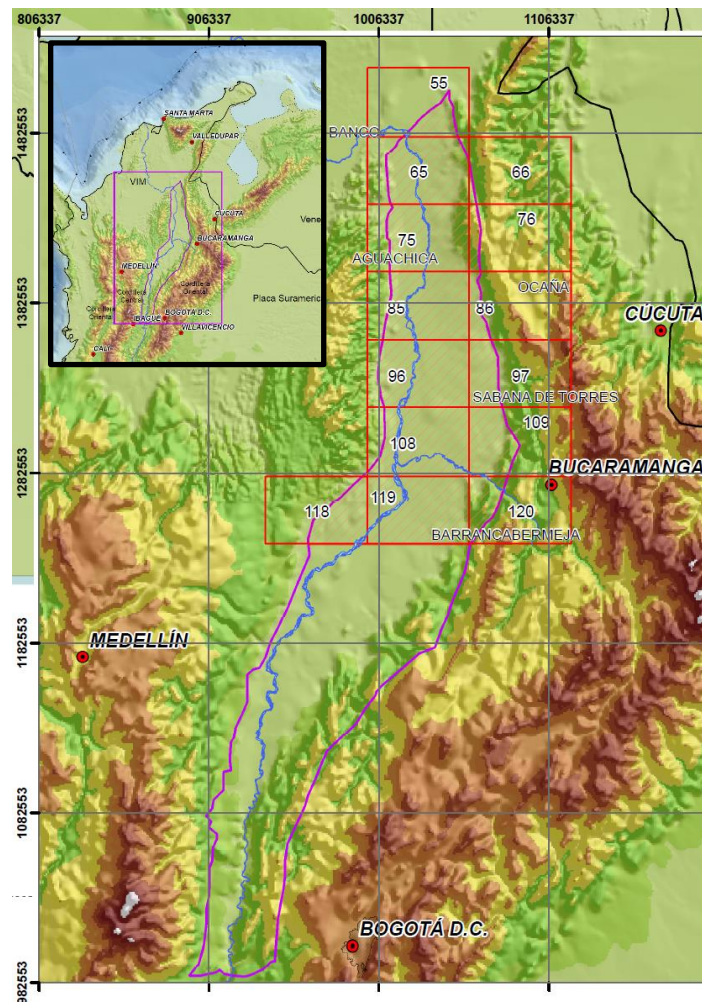


Figura 1-1 Ubicación geográfica del Valle Medio del Magdalena (VMM), y Relación de las planchas geológicas utilizadas para el estudio y ubicación del área de estudio, (Tomado de SGC, 2018).

Es importante resaltar, que adicional a la información geológica de la plancha No. 75, se utilizó los datos conexos incluidos en las planchas geológicas número 55, 65, 66, 76, 85, 86, 96, 97, 108, 109, 118, 119 y 120 del Servicio Geológico Colombiano - SGC, tal y como puede apreciarse en la Figura 1-1.

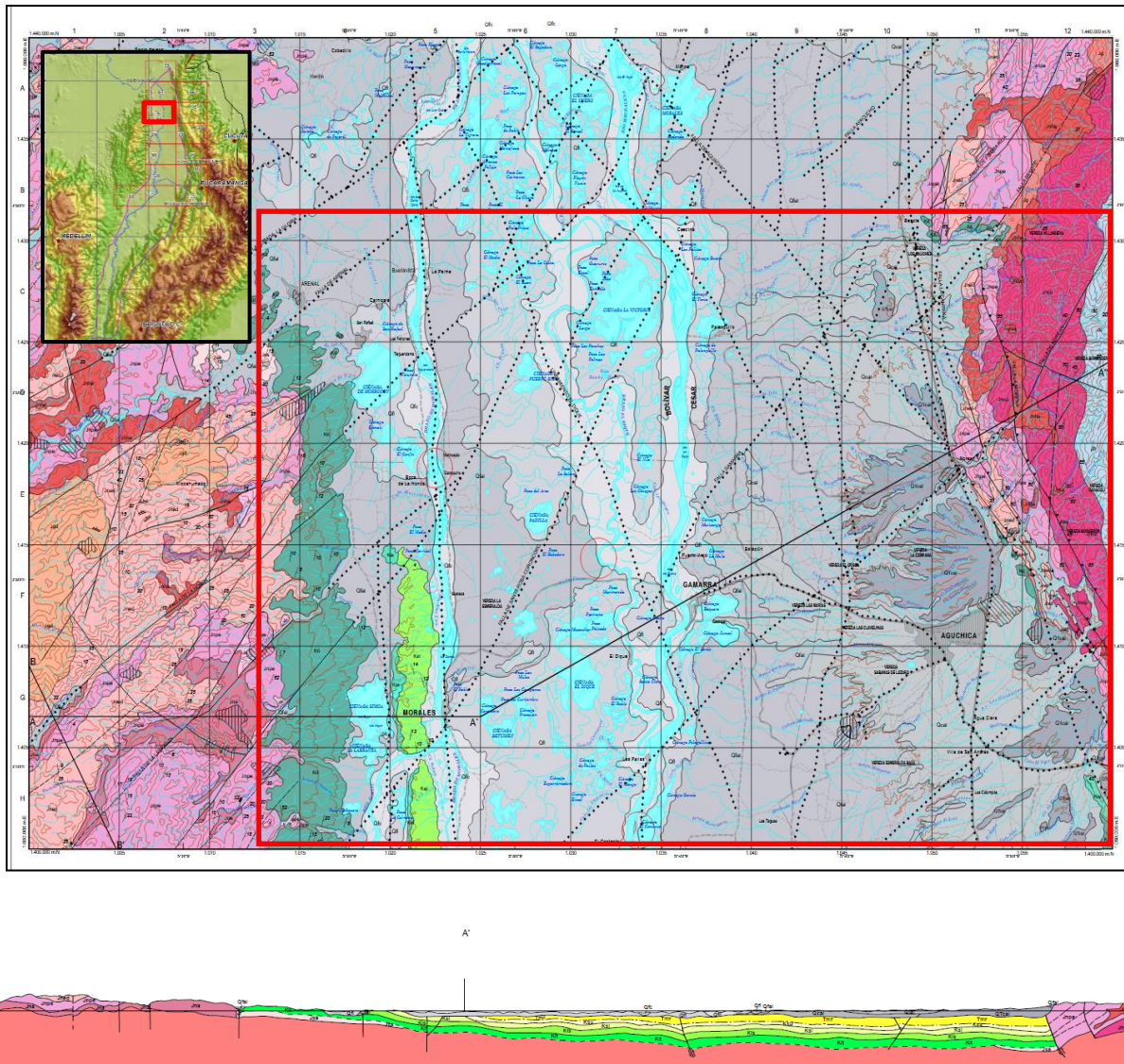


Figura 1-2 Mapa geológico y corte A -A'-A" (modificado por Gems, 2012), plancha 75, cuadrángulo F11, Aguachica, Ingeominas (SGC), (1996), el rectángulo rojo delimita el área principal de estudio.

1.6 Datos Geológicos y Geofísicos Utilizados

Los datos utilizados para la realización de este trabajo, comprende información sísmica 2D y 3D, registros eléctricos de pozo, datos del grupo de los macerales y bioestratigráficos; así como información relevante de estudios anteriores. La información sísmica cuenta con más de 460 líneas 2D con procesamiento de migración (MIG_I-I) y pre-apilado en tiempo (PSTM), distribuidas a lo largo y ancho de toda la cuenca del VMM, y con las cuales se crearon las transectas regionales para los análisis geológicos que competen a este trabajo.

La información sísmica 3D, cuenta también con procesos de migración y pre-apilado en tiempo. Los dos cubos seleccionados presentan una cobertura importante cerca al área de estudio y fueron útiles para el amarre sísmico y para la interpretación y seguimiento de los reflectores de interés u horizontes. Del universo de pozos exploratorios y productores existentes en la cuenca (Figura 1-3), se utilizaron los más representativos para la zona de estudio, Una muestra se encuentra enumerada en la Tabla 1-1 (El total de pozos utilizados se encuentran listados en los Anexos al final de este trabajo); estos pozos cuentan con un set de registros básicos, tales como Gamma Ray, Sónico, Resistivo profundo, Factor Fotoeléctrico, Densidad, Tablas tiempo/profundidad (Check-shot y VSP); además de información histórica, reportes de perforación, imágenes de gráficos compuestos, reportes bioestratigráficos, entre otros.

Además de la información descrita en la bibliografía (más de 50 referencias), fue necesario consultar los reportes geológicos y publicaciones de diferentes revistas (AAPG, SEPM y GSA), así como los proyectos de investigación regional entre otras documentaciones adicionales. Las fuentes de la información fueron el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Ecopetrol S.A., el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), la Universidad Nacional de Colombia, y demás fuentes públicas alojadas en portales Web.

En el capítulo No. 5.1, se presenta el Análisis e Integración de los datos Geológicos y Geofísicos utilizados en este trabajo.

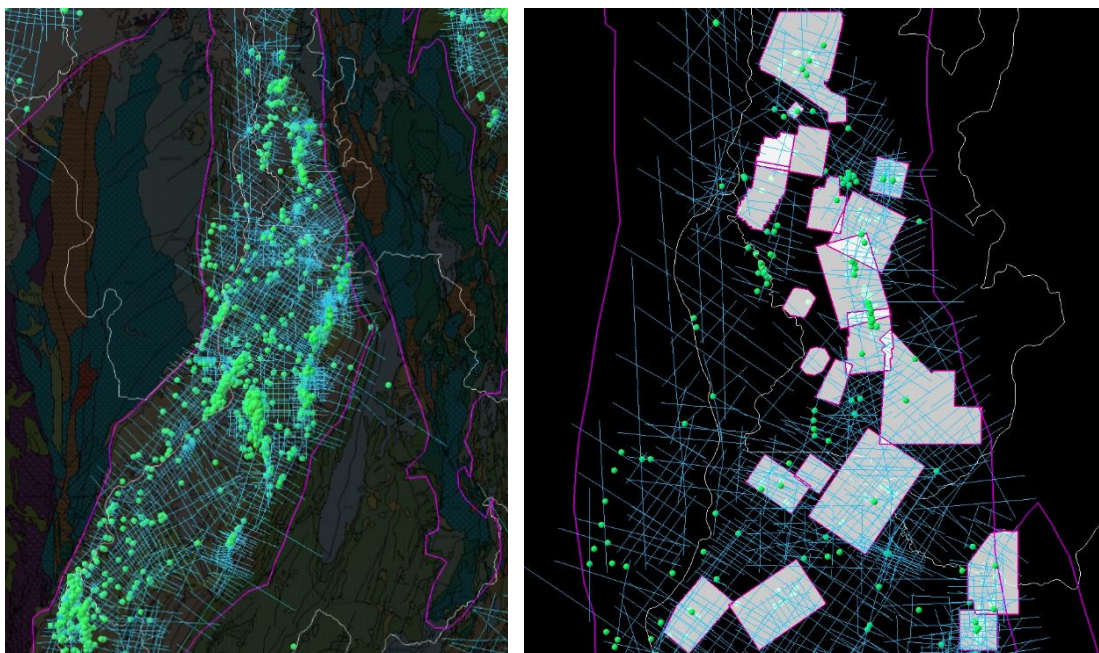


Figura 1-3 Mapas (Shape File) de localización de información sísmica 2D/3D y pozos existentes para el VMM, disponible para su carga y análisis petrotécnico (Tomado del proyecto Petrel creado para este estudio).

Para esta investigación de maestría, se utilizaron los datos y registros de cerca de 200 pozos exploratorios del VMM, particularmente los ubicados en el Sector Centro – Norte de la cuenca, dicha información fue de vital importancia para el amarre sísmico, ubicación de topes para la interpretación estratigráfica y estructural, las correlaciones, algunos análisis petrofísicos, determinación de espesores de las formaciones y finalmente, para la generación de los mapas de las unidades mesozoicas y cenozoicas.

A continuación, se presenta una pequeña muestra de los pozos y tipo de datos utilizados (Tabla 1-1), el listado completo de pozos podrá ser consultado en uno de los anexos al final del presente trabajo.

La selección de los pozos se orientó hacia el mejor y mayor cubrimiento de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, con el propósito de utilizar los datos duros de las perforaciones, para el refinamiento del modelo geológico y geofísico.

Tabla 1-1 Listado de algunos de los pozos exploratorios y estratigráficos del VMM, utilizados en esta investigación.

Pozo	UWI	Coordenada X (metros)	Coordenada Y (metros)	Referencia Datum	Valor Datum (pies)	TVDSS (pies)	Md (pies)	Calidad de la Información	Registros Básicos	Máxima Inclinación (°)
ACACIA-1	ACAC0001	965090.46	1200861.73	KB	496.0	3082.0	3578.0	BUENA	SI	0.00
BUKHARA-1	BUKH0001	969393.50	1190982.72	KB	423.0	6266.0	6689.0	BUENA	SI	0.00
GONGORA-1	GONG0001	950305.82	1146702.14	KB	513.6	7124.4	8273.0	BUENA	SI	30.37
CIMITARRA-1	CIMI0001	1013251.28	1279943.72	KB	238.8	9263.2	9502.0	BUENA	SI	0.00
HELIOS-1	HELI0001	962972.62	1184375.14	KB	408.0	5521.0	5929.0	BUENA	SI	0.00
CASABE-1	CSBE0001	1018556.06	1270289.24	KB	256.8	7945.2	8202.0	BUENA	SI	0.00
SAN_LUIS-12	SLUI0001	1050928.62	1240476.61	KB	651.0	1609.0	2260.0	BUENA	SI	0.00
LISAMA-4	LISA0001	1058725.55	1281647.00	KB	508.5	4220.5	4729.0	BUENA	SI	0.00
TESORO-1	TESO0001	1056888.58	1268708.89	KB	474.0	10353.0	10827.0	BUENA	SI	0.00
ANH VMM LA PISTA-1X	ANLP0001X	1044791.16	1489254.21	GL	211.77	1199,14	1199,14	BUENA	SI	0.00

1.7 Metodología de Trabajo

A partir de la integración de los datos e información existente de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, se permitió la construcción de un modelo geológico y geofísico que incorpora la Formación Umir en el área de interés (Figura 1-4).

Para lograr los objetivos propuestos, se aplicaron diferentes herramientas que, integradas de manera coherente, permitieron un análisis de la información que cumple con los alcances del proyecto.

Inicialmente se realizó la recopilación de la información disponible, análisis de reportes de pozos e información publicada a nivel nacional e internacional. El análisis de la información se centró en estudios anteriores realizados en el área de trabajo y zonas aledañas, enfocados hacia la estratigrafía y la geología estructural.

La información sísmica y de registros de pozos fue dispuesta en un software de integración geológica y geofísica (Petrel 2018, Openworks y Move 2017.2), donde se realizó la adecuación de los datos y se definieron las transectas sísmicas y los amarres de pozo, para la interpretación sismoestratigráfica y estructural de las secuencias de primer orden.

Seguidamente, se reconstruyeron las columnas litológicas de los pozos de interés siguiendo la metodología de Rider (2002) y Jurado (1989), a partir de datos de registros eléctricos de pozo y de la descripción de muestras de zanja y ripios. Con la anterior información se realizó un análisis electrofacial, siguiendo la metodología de Stuart *et al.*, (2014). Posteriormente, se refinaron las superficies de las secuencias de primer orden y se interpretaron otras de segundo orden, tomando como base los patrones de apilado, los ciclos de caída y subida del nivel base del mar y la bioestratigrafía, entre otros; estas superficies de secuencias fueron ajustadas a la sísmica mediante la realización de sismogramas sintéticos y tablas de tiempo/profundidad.

Estas actividades permitieron la realización de la estratigrafía sísmica, identificando los límites de secuencias, a través de la determinación de inconformidades y conformidades correlativas, siguiendo la metodología de Vail *et al.*, (1977).

Para definir la madurez de la Materia Orgánica y la generación de hidrocarburos, se tomó la Formación Umir como objetivo, debido a sus proporciones en porcentajes de TOC (Carbono Orgánico Total), Ro (Reflectancia de Vitritina), contenido de gas y % de Metano (ANH, 2012 y SGC, 2017).

Para la definición de los intervalos productivos de la Formación Umir, se aplicó una metodología geoestadística para realizar el análisis e interpretación de los registros eléctricos de los pozos más relevantes y cercanos a la zona de estudio, a través de la generación de crossplot como el gráfico de Pickett, con los cuales se determinó la resistividad del agua de la formación, estimando valores de saturación de fluidos con base en la ecuación de Archie, (Niz V. Eider, 2018).

Este trabajo pretende integrar algunas de las disciplinas de la exploración geológica y geofísica para el modelado de la Formación Umir, de edad Maastrichtiano medio a tardío, la cual fue asignada por foraminíferos (Tchegliakova, 1993), con el propósito de ampliar el conocimiento sobre la geometría, el espesor y la distribución de la misma, en el Sector norte del VMM.

Los análisis se apoyaron en datos de afloramiento, muestras de pozo, información de secciones sísmicas 2D y cubos 3D, datos geoquímicos, tales como Materia Orgánica (MO),

contenidos de gas y Reflectancia de la Vitrinita (%Ro), con los cuales se pudiera inferir cualitativamente el potencial generador de hidrocarburos para los recursos convencionales y no convencionales (HNC) sobre la zona de estudio.

La secuencia de actividades en términos generales se observa en la Figura 1-4.

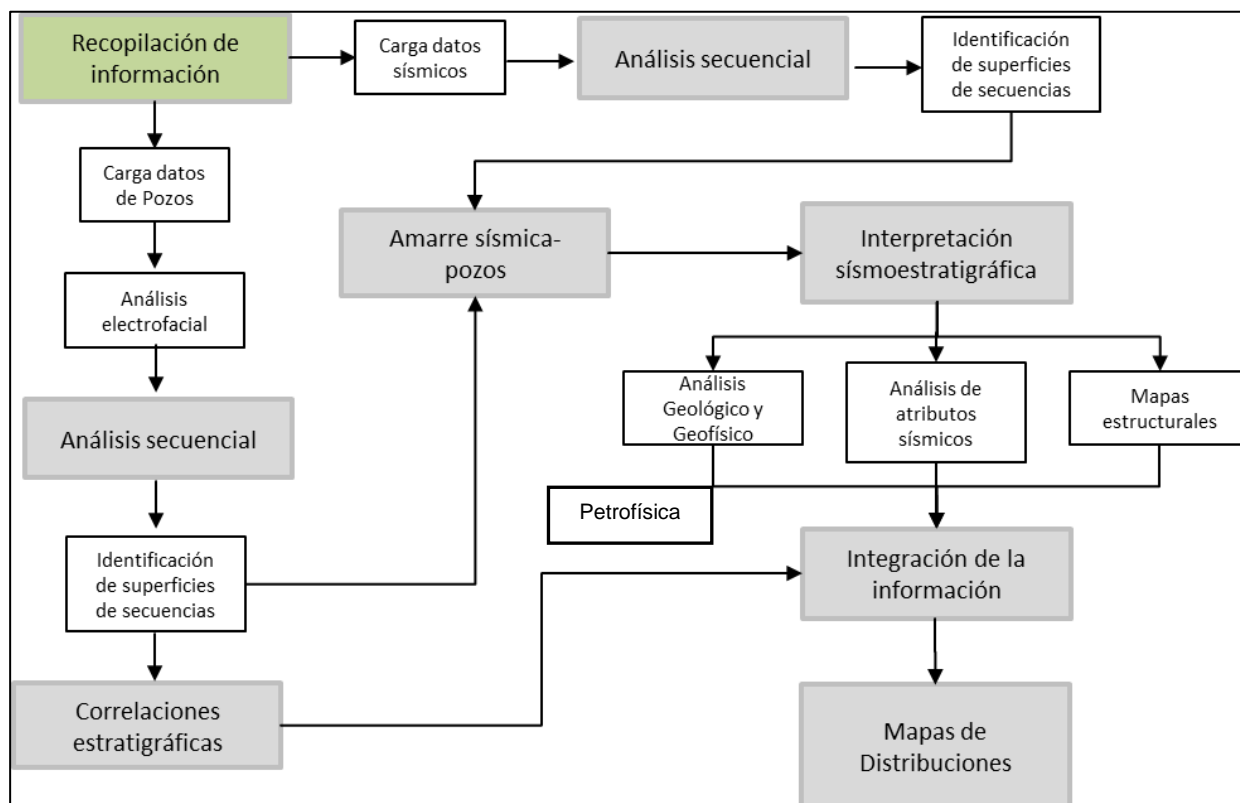


Figura 1-4 Secuencia metodológica aplicada para el trabajo de investigación.

1.8 Estado del Arte

Sobre esta cuenca se han realizado estudios de componente estratigráfico, sin embargo, sobresalen en su mayoría los estudios de carácter estructural y tectónico, los cuales han estado enfocados en conocer la evolución geológica de la cuenca. A su vez, existen trabajos estratigráficos y estructurales confidenciales, llevados a cabo por la industria del petróleo para la identificación de los elementos del sistema petrolífero, lo que deja entrever una falta de conocimiento geológico en algunas áreas del sector norte del VMM.

En la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, se han realizado numerosos estudios regionales y de bloques exploratorios, direccionados a la estratigrafía de secuencias y análisis tectono-estructurales, (Villamizar F., 2014), a continuación, se describen algunos de los más destacados:

Guerrero M. J., (2018). Realizó su tesis doctoral sobre los Eventos Tectónicos Pre-Andinos del Albiano al Eoceno en el Valle Medio del Magdalena y Situación del Costado Occidental de la Proto-Cordillera Oriental (Colombia). Donde presenta la conceptualización regional y la nomenclatura estratigráfica, los análisis de la estratigrafía secuencial, las interpretaciones de los cambios del nivel eustático, los mapas de distribuciones de facies en el norte, centro y sur de la cuenca del VMM y su integración para el entendimiento de la migración costera (Regresión/Transgresión) durante el Cretácico.

Así mismo, muestra la interpretación sobre las secciones sísmicas, desde el punto de vista crono estratigráfico para la identificación de las conformidades que limitan las secuencias sedimentarias. El documento también presenta los análisis, caracterización e interpretación de apatitos y circones que fueron recolectados en la fase de campo.

Muestra también, los esquemas de las secciones estructurales balanceadas desde el Jurásico al Cretácico (Berriasiano) hasta el presente; mostrando la deformación continua para la evaluación del acortamiento total y la evaluación de la deformación paleofacial.

Finalmente, el autor presenta la reconstrucción de la paleo-placa y la evolución tectónica cretácica del Valle Medio del Magdalena (VMM) y del flanco occidental de la Cordillera Oriental de Colombia (WEC).

Alvarado H., et al, (2017). Realizaron un Modelo Sismotectónico Cortical del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena, con el propósito de caracterizar y comprender la disposición de los componentes estructurales de la cuenca y su relación con la sismicidad de la zona, encaminado a la exploración de hidrocarburos no convencionales en el VMM; para ello, integraron la información disponible del Servicio Geológico Colombiano y de la Agencia Nacional de Hidrocarburos con fines académicos y geocientíficos.

Muñoz O., et al, (2016). Realizaron un modelo 3D del sector norte del VMM, donde se muestra la evolución tectónica de la cuenca y se propone un motor de deformación situado en el área de subducción-colisión de la Cordillera Central con el dominio oceánico de la

Cordillera Occidental. El estudio también analiza las facies sísmicas características de la cuenca y presenta la interpretación de las secuencias sismoestratigráficas incluyendo las principales discordancias del Cretácico y del Terciario.

Montaño P. C., et al, (2016). Quienes presentaron el Análisis de Secuencias y Procedencia en Sucesiones Sedimentarias de Grano Fino: Un Ejemplo de la Formación Umir y Base de la Formación Lisama, en el Sector de Simacota, Santander. Donde se evidencian los eventos de cinco superficies de inundación marinos/lacustres como fundamento de la estratigrafía de secuencias, presenta un análisis de la diferenciación de litologías para ambas formaciones y finalmente el documento hace referencia a que sobre la base de la Formación Lisama, se registra el desarrollo de paleosuelos y sucesiones de relleno de canal interrumpido por un intervalo de inundación marina, cuyo origen es más por eventos catastróficos (Tsunami) que por cambios graduales eustáticos, que se relacionan con el evento de impacto del asteroide en Chicxulub.

Garzón J. W., (2012). Recursos de Coal Bed Methane (CBM) en Colombia, que muestra la producción nacional de gas asociado al carbón, de las cuencas Cesar-Ranchería, Valle Medio del Magdalena, Sinú-San Jacinto y Catatumbo. Cuyo mayor interés es evidenciar el gran potencial que tiene el país, respecto a fuentes de hidrocarburos no convencionales.

Padrón C., et al, (2011). Realizaron para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), a través del consorcio PetroSeis-IGS, el Informe Final de Interpretación Sísmica, Componente Horizontal y Vertical, que presenta la integración conjunta de sísmica multicomponente de ondas convertidas con y sin registro sónico PP y PS, con atributos de inversión sísmica, para la identificación de oportunidades exploratorias en el programa ANH Línea Regional Trasandina 04A, Sección Oriental. El informe muestra la cartografía de cinco horizontes que representan las principales discordancias de cada sección, definiendo los estilos estructurales existentes en la zona de estudio y la cual incluye el sinclinal de Nuevo Mundo.

Blandón A. et al, (1989-2019), Quien realizó varias investigaciones, artículos y material de clase para la Universidad Nacional de Colombia, referentes a las características de la materia orgánica presente en la Formación Umir entre otras unidades mesozoicas y su correlación con campos productores de hidrocarburos en el VMM.

2.Marco Tectónico

Según Cortés et al., 2005 y Taboada et al., 2000 “El área de estudio, se enmarca dentro de los sistemas andinos de la Serranía de San Lucas y de la Cordillera Oriental, las cuales están limitando a la cuenca del Valle Medio del Magdalena. La Serranía de San Lucas y el VMM forman un extremo de la Cordillera Central, la cual está separada de la Cordillera Oriental por una zona de colisión” (Citado en Cuellar M., et al., SGC, 2016).

De acuerdo a las evidencias, la Cordillera Oriental es un orógeno (La orogénesis es un proceso geológico mediante el cual la corteza terrestre se acorta y se pliega en un área alargada producto de empuje lateral), de doble vergencia con Formación de cabalgamientos frontales dirigidos hacia las cuencas de ante-país de Los Llanos Orientales al este y del Valle del Magdalena (VM) al oeste. El frente de cabalgamiento de la Cordillera Oriental sobre el VMM constituiría la pro-zona (pro-wedge), mientras que el cabalgamiento frontal sobre los Llanos constituiría la retro-zona (retro-wedge), (Cuellar M., et al., SGC, 2018).

Los datos de adquisición geofísica y la sismicidad de profundidades intermedias y profundas, corroboran por debajo del Valle del Magdalena y la Cordillera Oriental, la existencia de una placa tectónica (que es un relicto de corteza oceánica que podría ser de origen Paleo-Caribe (Taboada et al., 2000), la cual desciende hacia el este bajo la corteza continental de la placa Sudamericana. Esta antigua placa, se define muy bien con los datos de micro-sismicidad de eventos mayores a 50 Km de profundidad (datos recogidos y analizados por la Red Sismológica Nacional, (Calvache M. et al, 2018). Las teorías de cómo se relaciona la paleo-subducción con la formación de la Cordillera Oriental y del VMM, se han propuesto esencialmente en las siguientes dos hipótesis, (Taboada et al.2000 y Cortés et al., 2005):

- A. Modelos con motor de la deformación lejano a la Cordillera Oriental. En estos modelos el área de colisión ocurre en el límite de la Cordillera Central con los terrenos oceánicos acrecionados de la Cordillera Occidental (Figura 2-1). La conexión de la zona de colisión y sutura con el orógeno de la Cordillera Oriental, se realiza por un largo despegue en la corteza bajo la Cordillera Central (Dengo y Cowey, 1993, Caballero et al., 2013).

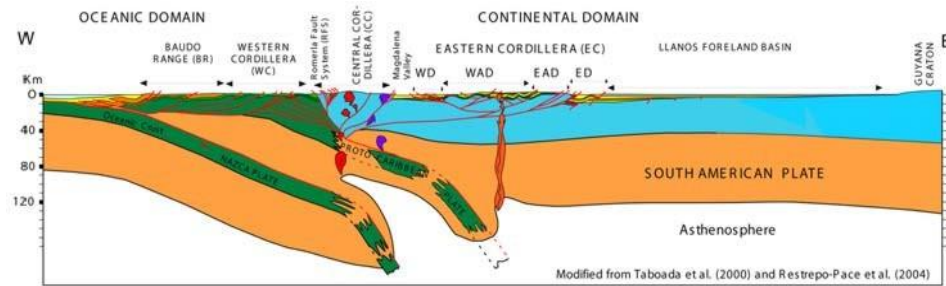


Figura 2-1 Evolución tectónica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena con motor lejano de deformación (Tomado de ANH, 2015).

B. Modelos con motor de la deformación en una colisión entre cortezas continentales, donde la corteza adelgazada de la Cordillera Central está en subducción bajo la corteza del Escudo de la Guyana, bajo el eje de la Cordillera Oriental (Figuras 2-2). Según Colletta et al., 1990; Restrepo Pace en Cediel y Cáceres, 2000, Taboada et al. 2000, Cortés et al., 2005. “En estos modelos las fallas de la Cordillera Oriental convergen en una raíz crustal donde ocurre la delaminación de la corteza por indentación de la Placa de Sudamérica” (Citado en García S. J., et al., 2015).

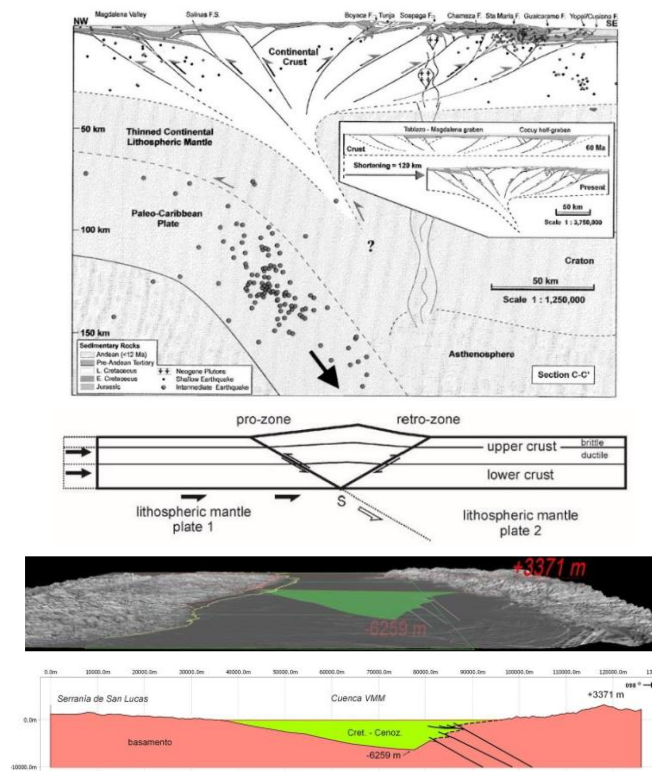


Figura 2-2 Evolución tectónica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, con motor de deformación por colisión (Tomado de Sarmiento, 2011 y ANH, 2015).

Lo más importante de este tema, es que el modelo tectónico seleccionado, determinará el campo de esfuerzos sismogénicos que han transformado el VMM, que enmarca la zona de estudio.

El consenso actual, es que ambos modelos son o fueron aplicables, pero en distintas etapas evolutivas del territorio. Los modelos con motor de la deformación en la subducción-colisión entre las Cordillera Occidental y Central son apropiados para explicar los cabalgamientos de vergencia hacia el este enterrados bajo el VMM (que sería la Fase Pre-Andina, Maastrichtiano-Paleoceno) Según Bayona et al., (2013), mientras que el modelo de colisión en el eje de la Cordillera Oriental, sería apropiado para explicar los cabalgamientos de vergencia oeste que están elevando la Cordillera Oriental, sobre el VMM (Fase Andina, Eoceno-presente), (Cuellar M, et al, 2018).

La conformación o geometría final adquirida en ambas fases de evolución, se asemeja a una zona triangular, pero se contrasta de ésta, en que las diferentes edades de la deformación no permiten la transferencia del desplazamiento entre cabalgamientos opuestos (SGC, 2018). Esto se puede sintetizar en la siguiente imagen modificada de Taboada et al. (2000). Figura 2-3, (Ver también figura 2-2).

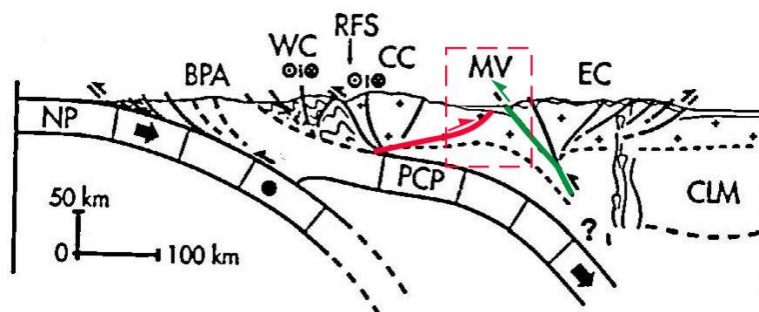


Figura 2-3 Esquema del Norte de los Andes (modificado de Taboada et al., 2000), donde se enfatiza la zona triangular (recuadro rojo) que se forma entre los cabalgamientos frontales de vergencia opuesta con edades diferentes. El cabalgamiento dirigido hacia el Este, está fosilizado bajo los sedimentos Eocenos del VMM (color rojo, Fase Pre-Andina), quedando asegurado en la zona de colisión de las cordilleras Occidental y Central. El cabalgamiento dirigido hacia el oeste (color verde, que corresponde a la Fase Andina) es emergente y se enraíza en la colisión de cortezas bajo la Cordillera Oriental. NP- Placa de Nazca, PCP- Placa Paleo-Caribe, RFS- Sistema de fallas de Romeral, CLM- manto litosférico continental, WC- Cordillera Occidental, CC- Cordillera Central, EC- Cordillera Oriental, MV- Valle del Magdalena (Tomado de SGC-ANH, 2016).

Finalmente, y Según Sarmiento et al., (2015) “El VMM presenta estructuras dispuestas en una serie de cabalgamientos con vergencia predominante al oeste, las cuales están suprayacidas por depósitos del Cenozoico. Se han encontrado unidades jurásicas y paleógenas con sistemas de fallas que se encuentran por encima del basamento sub-mesozoico” (Citado de SGC, 2016), y por lo demás, la discordancia sub-eocena entre las formaciones Lisama y Esmeraldas, que se toma como un rasgo estructural importante (Gómez et al., 2005). Así como la presencia de abanicos imbricados con fallamiento inverso, que buzcan hacia el oeste y como acortamiento a lo largo de fallas normales mesozoicas reactivadas con principal actividad en el sub-Eoceno (Parra et al., 2012). La figura 2-4, muestra el mapa tectónico actualizado (Tomado del SGC y modificado por Mahan J., 2019), el cual incluye la Plancha Geológica No. 75 con la zona de estudio.

Es posible que varias de las fallas existentes en la zona sean activas actualmente, este supuesto se basa en la sismicidad registrada instrumentalmente en ese sector del país, a partir de la entrada de las operaciones de la Red Sísmica Nacional de Colombia o RSNC en 1993 (Calvache M., et al, 2015).

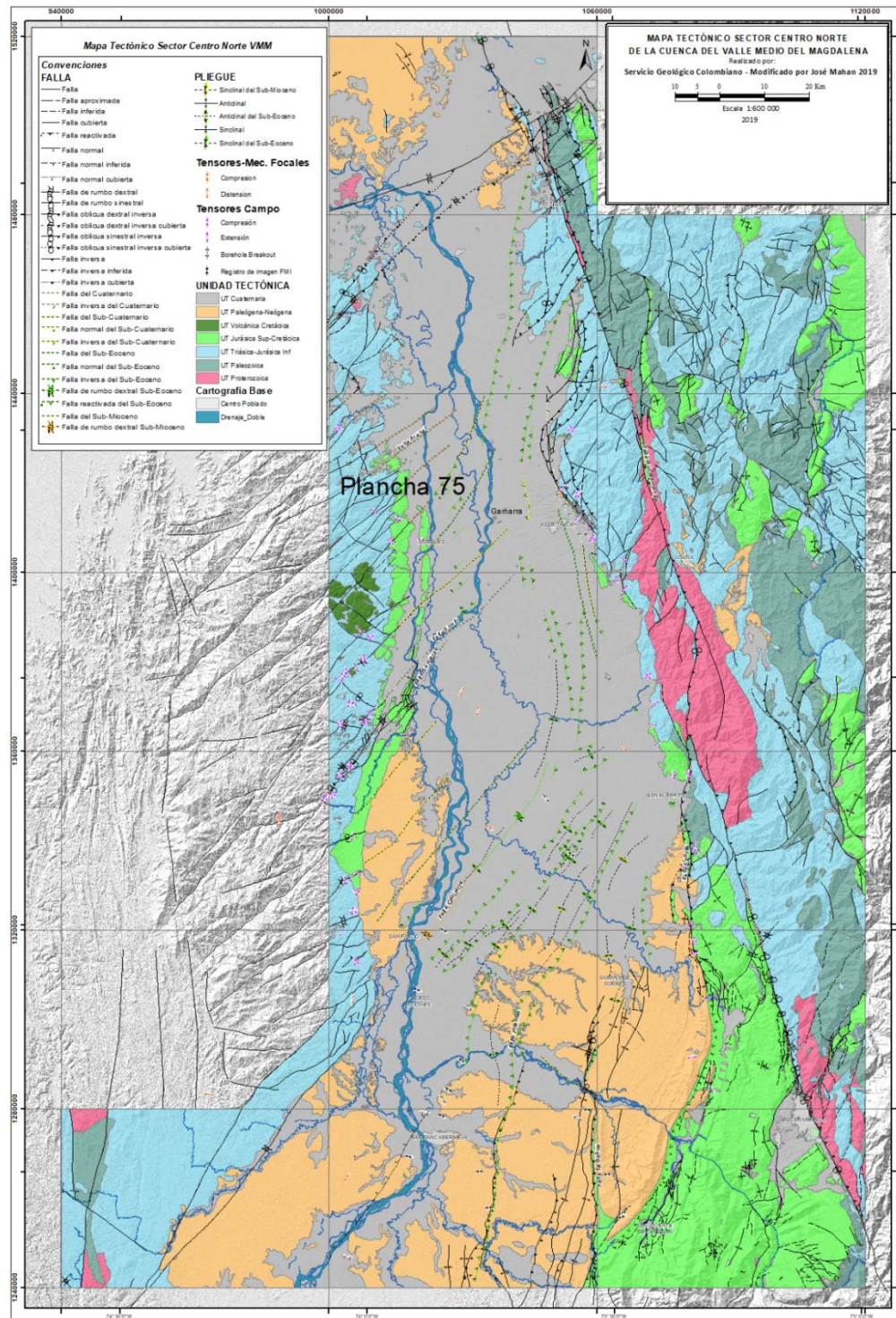


Figura 2-4 Mapa Tectónico actualizado del Sector Centro – Norte del VMM, (Tomado del SGC, 2017 y modificado por Mahan J., 2019).

3.Marco Geológico Regional

El Valle del Magdalena (VM), corresponde a una cuenca sedimentaria intramontana ubicada geomorfológicamente entre las Cordilleras Oriental y Central de los Andes de Colombia por el que fluye de sur a norte el Río Magdalena. De forma general se encuentra limitada al norte por el sistema de fallas Espíritu Santo, al Noreste por el sistema de fallas de Bucaramanga, al Sureste por el sistema de fallas Bituima y la Salina, al Sur por el Cinturón plegado de Girardot y al Oeste por los sedimentos del Neógeno que cubren la Serranía de San Lucas y por el basamento de la Cordillera Central, (Lozano & Zamora, SGC, 2014). La industria petrolera, por su importancia en reservas hidrocarburíferas, lo ha subdividido en tres sectores conocidos como Valle Superior del Magdalena (VSM), Valle Medio del Magdalena (VMM) y Valle Inferior del Magdalena (VIM), (Sarmiento et al, 2015).

Particularmente, el área de estudio está enmarcada dentro del Sector norte del VMM y está limitada al sur por la Falla de Cimitarra, al oriente por el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta y al Occidente por la Serranía de San Lucas y el sistema de fallas de La Palestina, (Figura 3-1), (Sarmiento et al, 2015).

La compleja historia tectónica de la cuenca, en la zona de estudio, está definida por dos principales rasgos estructurales, al oriente la Falla de Bucaramanga, que es un sistema de fallas de rumbo sinistral con lineamiento estructural en dirección noroeste-sureste, con expresión topográfica visible y actividad tectónica reciente. Al occidente está limitada por el sistema de fallas de La Palestina, que son fallas multi-temporales que separan los conjuntos supracorticales Paleozoicos de la sucesión sedimentaria cenozoica. Esta particularidad tectónica define los esquemas de sedimentación de las unidades cretácicas, paleógenas y neógenas; de igual forma la Falla de Bucaramanga y su sistema de cabalgamiento transforma el estilo estructural de ambas sub-cuencas, (Sarmiento et al., 2015).

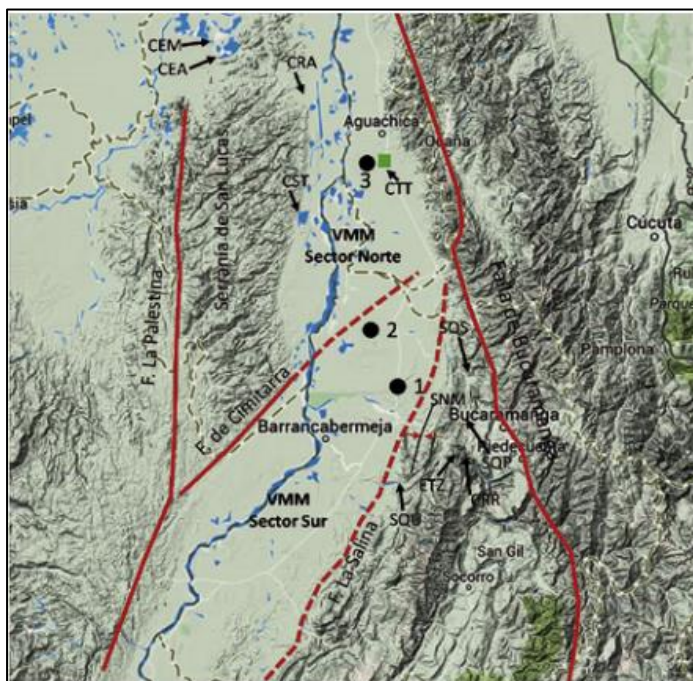


Figura 3-1 Mapa tectono-estructural que incluye el área de estudio (Tomado de Gómez et al., 2007).

La evolución geológica de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), es el resultado de una gran variedad de eventos que se relacionan con la geodinámica del planeta Tierra y que se han venido produciendo desde el Paleozoico tardío hasta nuestra época.

Durante el Mesozoico (Triásico y Jurásico), el VMM se comportaba como una cuenca distensional formada en el interior de una placa tectónica, también conocido con el término aulacógeno, al producirse un efecto de apertura o Rifting, que se origina normalmente a partir de una zona de triple unión tectónica (lugar de convergencia de tres placas), donde dos zonas de rift originan mares u océanos con márgenes continentales pasivos, y la tercera zona se convierte en una fosa tectónica continental, (Shatsky N., 1946), y que para el caso particular del VMM se relaciona con la separación de Norteamérica y Suramérica. Los depocentros (área de máxima deposición dentro de una cuenca sedimentaria), desarrollados en la fosa tectónica, se ubicaban a todo lo largo de la proto Cordillera Oriental y del Valle Superior del Magdalena (VSM), mientras que los bordes se localizaban en lo que hoy es la cuenca del Putumayo y el escudo guyanés, (ANH, 2014).

La siguiente figura resume los principales eventos que deformaron y permitieron la evolución tectono-estratigráfica de la cuenca del Magdalena.

ERA	PERIODO	EPOCA	CUENCA	EVENTOS TECTONO ESTRATIGRAFICOS DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA		
CENOZOICO	QT	Holoceno	CUENCA INTRAMONTAÑA	CUATERNARIO		Hacia Finales del Mioceno, el Arco de Panama colisiona contra Suramerica, lo que genera el mayor pulso de deformacion de la Cordillera Oriental. Este levantamiento hace que la Cordillera Oriental se comience a erodar y las fallas preexistentes Extensionales se reactiven como fallas compresionales.
		Pleistoceno		FM. MESA		
	NEOGENO	Plioceno		FM. REAL		
		Mioceno		FM. COLORADO		
	PALEOGENO			Oligoceno	FM. MUGROSA	
		Eoceno		FM. ESMERALDAS	SEDIMENTACION CONTINENTAL	Los Aumentos en las tazas de Convergencia de las placas y los cambios de direccion comienza a generar los primeros pliegues y cablagamientos de la cuenca del Valle Medio.
			FM. LA PAZ			
		Paleoceno	Discordancia del Eoceno inferior.			
	FM. LISAMA		SEDIMENTACION CONTINENTAL	los levantamientos de la cordillera central y primeros indicios del levantamiento de la cordillera oriental, genera un cambio en la sedimentacion de secuencias de la cuenca de Marinas a continentales.		
	MESOZOICO	CRETACEO	TARDIO	CUENCA DE MARGEN PASIVO	FM. UMIR	SEDIMENTACION DE SECUENCIAS MARINAS
FM. LA LUNA					Para Finales del Cretacico, la actividad Volcanica de la Cuenca se intensifica; lo que revela un incremento o cambio de la tasa de convergencia o cambio de direccion de las placas.	
FM. SALTO FM. SIMITI					Hacia el Cretacico Tardio, la dismicucion de la tasa de convergencia genera un suspension de la Actividad Volcanica en la Cordillera.	
TEMPRANO			FM. TABLAZO		SEDIMENTACION CONTINENTAL	Durante el Cretacico Temprano, la acrecion del terreno Amaime genera un estrechamiento en la parte posterior de la cuenca de Back Arc. Este Estrechamiento permitio tener una apertura de cuenca y subsidencia que generaron depositos espesos del Cretacico Temprano.
			FM. PAJA			
			FM. ROSABLANCA			
JURASICO		CUENCA DE AULACOGENOS	FM. TAMBOR	SEDIMENTACION INTRA RIFTING	Durante el Triasico Jurasico se separaron Norteamerica y Suramerica en el protocaribe, generando cuencas extensionales entre las placas (Cuenas Aulacogenas), hacia finales del Jurasico y comienzos del Cretacico aumenta la subsidencia de la placa del Caribe por debajo de la placa de Suramerica.	
			FM. GIRON			
	TRIASSICO SUPERIOR					

Figura 3-2 Resumen de eventos tectono-estratigráficos desarrollados en el VMM Adaptado de Cooper et al, 1995; Gómez, 2005, Caballero 2010, (Tomado de ANH, 2014).

Más adelante en el tiempo geológico, sobre la proto Cordillera Oriental, se desarrollaron otras dos cuencas de tipo extensional, las cuales corresponden a Cocuy y Tablazo–Magdalena (Figura 3-3, parte A). Estas cuencas, de margen pasivo, se mantienen activas desde comienzos del Cretácico (parte B). El estrechamiento del retro-arco detrás de la zona de subducción de la costa Oeste de Suramérica, genera la apertura y subsidencia de la misma, y la sedimentación se identifica con ambientes marinos someros, (Cooper et al., 1995), manteniendo la tasa de acumulación mientras la cuenca experimenta subsidencia, (Etayo et al., 2003). Durante esta fase se presentan varias etapas en las que la tasa de hundimiento disminuye, generando condiciones ideales para el desarrollo de depósitos calcáreos. Hacia el Maastrichtiano, la Cordillera Central comienza a levantarse (Figura C), aunque al parecer, la Cordillera Central siempre estuvo a manera de altos sumergidos y

actuando como una barrera submarina entre los Andes Occidentales y los Orientales (Córdoba F. et al., 2000).

Hacia el Terciario se reconocen cuatro sucesos de deformación, el primero corresponde al evento Cretáceo Tardío-Paleoceno que está relacionado con la acreción final de la Cordillera Occidental, de forma oblicua, contra la Cordillera Central; Como resultado, los ambientes de depósito de la Cordillera Oriental, el Valle Medio del Magdalena y la Cuenca de los Llanos cambian de ambiente marino a continental dentro de una cuenca de foreland incipiente; esta deformación, de carácter compresional, está relacionada por la convergencia oblicua de la placa de Nazca contra Sudamérica, (Valentín et al., 2000).

El segundo evento, corresponde a la alta deformación del Eoceno Medio que genera pliegues y cabalgamientos. (Figura D). Estos pliegues se observan truncados en la parte superior, por depósitos clásticos del Eoceno a través de la discordancia del Eoceno Inferior; Así mismo, esta deformación se relaciona con el aumento de la tasa de convergencia de la placa de Nazca. Durante el Oligoceno-Mioceno, se registra la reactivación de las estructuras del Eoceno Medio, generando así, durante el Oligoceno Superior, el tercer pulso o evento de deformación de la cuenca. Este suceso se debe a los cambios de movimiento entre las placas tectónicas, (ANH, 2014).

En el Mioceno Medio, el Terreno Cuna (Chocó) colisiona contra el margen nororiental de Suramérica contribuyendo a los inicios de deformación de la Cordillera Oriental (Figura E). La colisión del Arco de Panamá con Suramérica marca el mayor pulso de deformación de la Cordillera Oriental generando el levantamiento, la erosión, reactivación e inversión del estilo tectónico, (Restrepo & Toussaint et al., 1988; SGC, 2015).

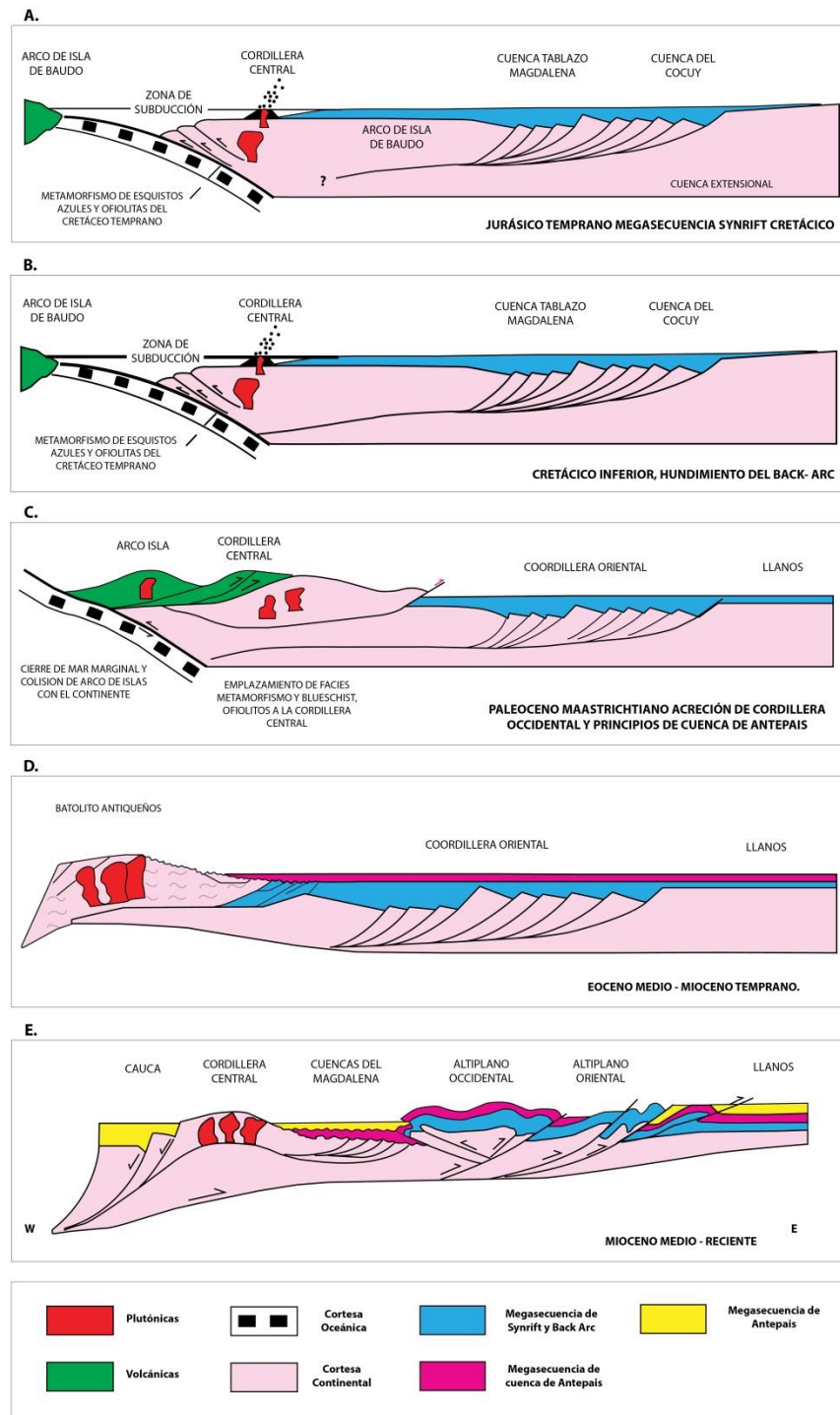


Figura 3-3 En la figura se observa la evolución del Valle Medio del Magdalena a través de una cuenca extensional (A), Cuenca de Margen Pasivo (B), Cuenca Foreland (C y D) y cuenca intramontana (E), con sus diferentes tipos de depósitos, (Cooper et al; 1995).

La siguiente imagen, (tomada de Sarmiento et al., 2011), representa el desarrollo de las cuencas Llanos y Valle del Magdalena, a través del tiempo geológico y ubica la zona de estudio, contrario a la imagen anterior (figura 3-3), poniendo el evento más reciente en la parte superior del diagrama (F), y los más antiguos, en la parte inferior (secuencia A-E).

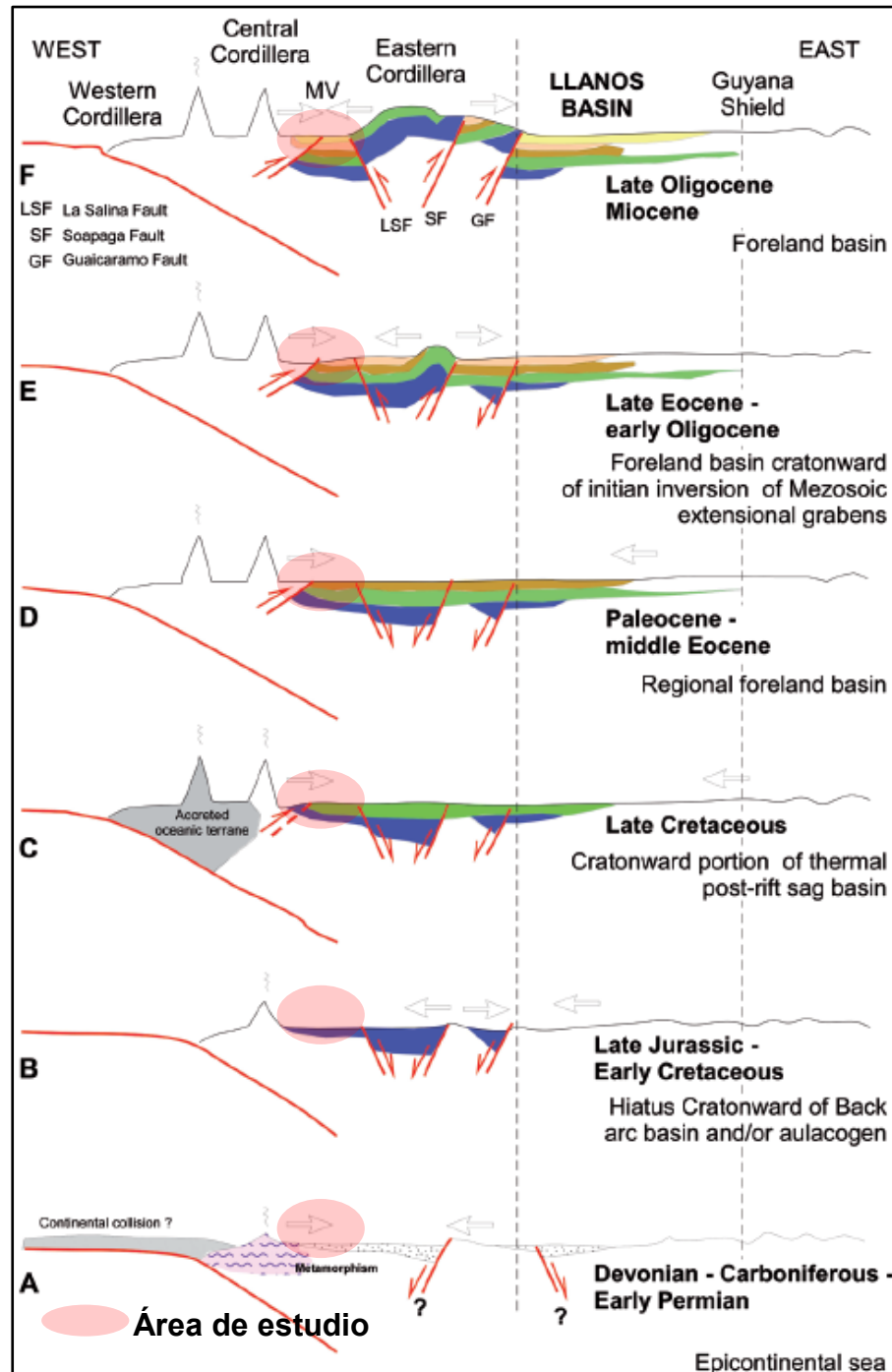


Figura 3-4 Evolución tectónica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Tomado de Sarmiento, 2011).



Figura 3-5 Mapa geológico actualizado del Sector Centro – Norte del Valle Medio del Magdalena. Se incorpora el refinamiento estructural realizado por el Grupo de Tectónica del Área de Geociencias Básicas del SGC, (Modificado por Mahan J., 2019).

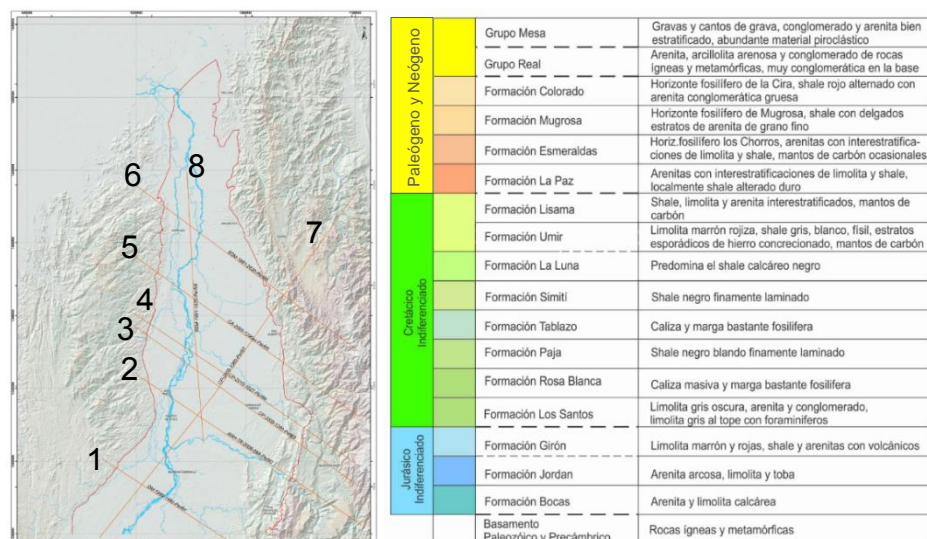


Figura 3-6 Transectas definidas (líneas color naranja 1-8) al Centro y Norte del VMM, utilizados previamente en la construcción de los perfiles geológicos y estructurales; Leyenda general de las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio (tabla modificada de Morales, 1958, Ward et al., 1973, Mahan J., 2019). Tomados del SGC, 2019.

Un estudio previo realizado para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), en convenio con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el año 2016, presentó ocho transectas regionales convertidas del dominio de tiempo al de profundidad, donde se integró la información disponible de ese momento, con el propósito de conocer la disposición geológica y estructural de la región y refinar el mapa tectónico de Colombia.

En la siguiente imagen (Figura 3-6), se presenta la disposición de las transectas y las convenciones para las unidades lito y crono-estratigráficas dispuestas en los perfiles.

3.1 Transectas Regionales

A continuación, se presentan los perfiles y el resumen de la información geológica y estructural de cada una de las transectas generadas en el estudio del SGC del 2016.

Tabla 2-1 Datos de cubrimiento y orientación transectas regionales VMM. (Fuente ANH-SGC, 2016).

Transecta	Longitud (Km)	Orientación
Transecta 1	93	N303°-N123°
Transecta 2	150	N304°-N124°
Transecta 3	152	N306°-N126°
Transecta 4	149	N304°-N124°
Transecta 5	152	N306°-N126°
Transecta 6	152	N307°-N127°
Transecta 7	239	N217°-N377°
Transecta 8	148	N356°-N176°

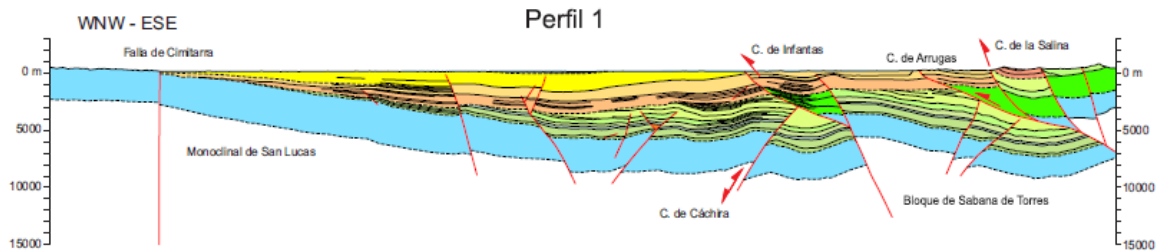


Figura 3-7 Perfil 1. Es la sección que se encuentra más al sur, en el costado suroriental se observa el sistema de fallas de La Salina.

La sección No. 1, presenta de E a W las estructuras correspondientes al paquete o lámina cabalgante de La Salina, que se mueve hacia el W en un imbricado de cabalgamientos donde afloran los de La Salina y Arrugas, con despegue en la base del cretácico y cabalgando sobre el Bloque de Sabana de Torres; quien a su vez está plegado en un largo anticlinal sobre la falla de Infantas. Los autores han interpretado esta estructura como Pre-Andina, que fue reactivada en la fase Andina, (Cuellar M. et al., SGC, 2018). La falla Infantas corta el Grupo Real y aflora como activa.

Más al Oeste se encuentra una zona triangular ubicada entre los cabalgamientos de Infantas y Cáchira, (Muñoz O., et al., SGC, 2016), conformando un bloque Jurásico-Cretácico, el cual está plegado como sinclinal, y puede ser considerado como un horst, producto de la reactivación de sus fallas normales limítrofes a inversas.

El cabalgamiento de Cáchira, es producto de una falla de alto ángulo que acomoda toda la columna de sedimentos del Jurásico al Cenozoico, al parecer esta falla fue de origen extensional durante el Jurásico y reactivada en inversa formando anticlinales que pliegan levemente al Grupo Real, (SGC-ANH, 2019).

Continuando al Oeste, se ubica el Sinclinal del Terraplén que inicia en la falla de Cáchira con un flanco corto, el cual se va configurando en el monoclinal de San Lucas; es en esta parte de la sección donde las unidades cretácicas se truncan contra la discordancia del Sub-Eoceno, indicando que el basculamiento de la secuencia es Pre-Andino, siendo lo demás contemporáneo a la sedimentación del Cenozoico, terminando acuñada contra la Falla de Cimitarra, que es una falla profunda de origen cortical (Paris et al., 2000; SGC, 2016).

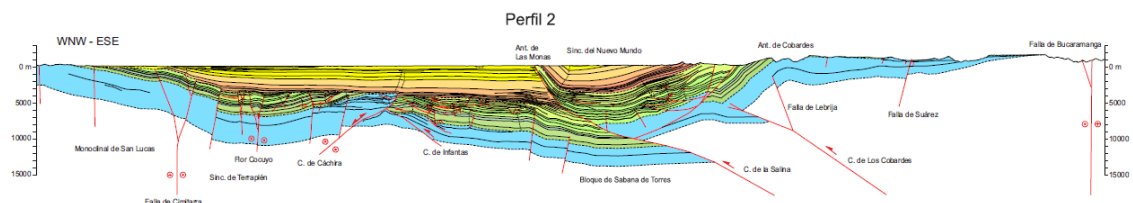


Figura 3-8 Perfil 2. Esta sección está compuesta por la línea sísmica ANH-TR-2006-04A.

La Transecta No. 2, creada e interpretada sobre la línea sísmica Trasandina 2D ANH-TR-2006-04A (Sección Oriental), la cual exhibe el Sinclinal de Nuevo Mundo al Este, El Valle Medio del Magdalena y la Serranía de San Lucas al Oeste, incluyendo el flanco de la Cordillera Oriental hasta la Falla de Bucaramanga.

Hacia el Este de la sección, se encuentra la Falla de Bucaramanga que se profundiza verticalmente en la corteza, cortando las rocas del basamento paleozoico y precámbrico, truncando al Jurásico bajo un Cretácico discordante (Julivert, 1958). En esa zona las fallas de Suárez y Lebrija, desplazan la columna Jurásica y la cretácica suprayacente (SGC-ANH, 2016).

El Anticlinal de Cobardes, es un pliegue monoclinual de vergencia al oeste, en el que se encuentran deformados el Jurásico y el Cretácico con un núcleo cristalino correspondiente a basamento paleozoico-precámbrico. El Cabalgamiento de Los Cobardes, produce el hundimiento de las rocas mesozoicas, que a su vez duplica y pliega la columna cretácica aflorante (Ochoa A., et al., SGC, 2016).

El Sinclinal de Nuevo Mundo, que es una cuenca sedimentaria cenozoica, presenta un perfil disimétrico, largo al este y corto al oeste, que se empata con el anticlinal Las Monas, cuyos orígenes se relacionan por el Cabalgamiento de La Salina, quien es el que ha transportado y levantado las unidades rocosas de la zona (Sánchez, 2011, Caballero et al., 2013).

Más al Oeste, se encuentra el Bloque de Sabana de Torres, el cual está limitado entre los cabalgamientos de La Salina e Infantas, el cual es un bloque monoclinual, levemente inclinado al sureste que presenta algunos plegamientos asociados a fallas inversas que eran extensionales en el Jurásico, pero que se invirtieron al cambiar la cuenca a un ambiente compresivo (Sarmiento et al., 2011, Ochoa A., 2016). En este sector la Formación Umir del Maastrichtiano presenta un espesor potente hacia el cabalgamiento de La salina, terminando acuñada sobre un pliegue anticlinal sobre el Cabalgamiento de Infantas; el cual es decapitado y fosilizado por la discordancia del Sub-Eoceno medio, lo que implica que su Formación fue Pre-Andina (Muñoz, O. et al., 2014). Las formaciones Cenozoicas, sobre el Cretácico incrementan el espesor hacia el cabalgamiento de La Salina. El Cabalgamiento de Infantas termina cortado por el cabalgamiento de Cáchira que

le es opuesto, produciendo una zona de apretamiento debido al efecto de puntal de las fallas distensionales jurásicas, las cuales son anteriores al Eoceno medio (ANH, 2015).

Avanzando hacia el oeste, se encuentra una zona triangular deprimida, ubicada entre los cabalgamientos de Infantas y Cáchira, conformando un bloque plegado que se ha interpretado como un horst invertido producto de contracción, de edad jurásica (Rodríguez L. et al., SGC, 2016)

El Cabalgamiento de Cáchira, levanta toda la columna Jurásica y Cretácica, pero se trunca contra la discordancia del Sub-Eoceno medio, esta estructura se interpreta como la inversión parcial de un semigraben o de tipo arpón (Bustamante E. J., 2016), formada por la inversión de la fase Pre-Andina en el Jurásico, la cual se reactivó durante la fase Andina, lo cual se evidencia por desplazamientos de la discordancia del Eoceno medio, produciendo plegamientos hasta el Grupo Real (SGC, 2014).

Finalmente, el Sinclinal del Terraplén y el Monoclinal de San Lucas se extienden al oeste, cortados por varias fallas verticales y sub-verticales, entre ellas las fallas Cáchira, Flor Cocuyo y la Falla Cimitarra con estructuras en flor (García S. J. et al., SGC, 2015).

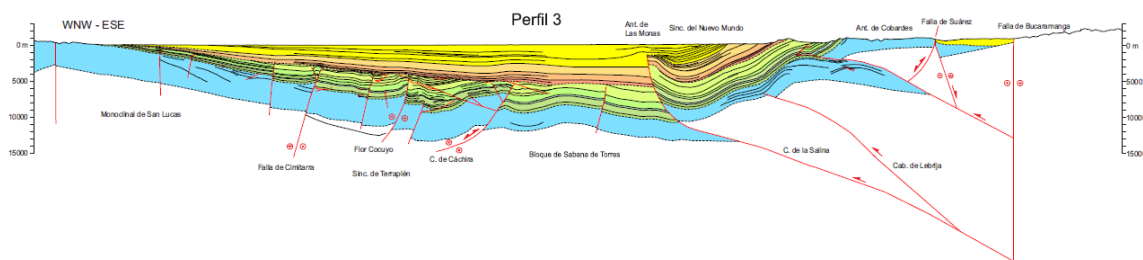


Figura 3-9 Perfil 3. Esta transecta ubicada más al norte de la anterior, muestra al límite oriental, el sistema de fallas Santa Marta-Bucaramanga y el Sinclinal de Nuevo Mundo, al oriente no se contaba con cubrimiento sísmico, por lo que la interpretación fue realizada con base en la información geológica de superficie y de la extrapolación de líneas sísmicas adyacentes.

La sección 3 inicia al este con la Falla de Bucaramanga, que como se explicó anteriormente, tiene dirección levógira (contrario a las manecillas del reloj), que atraviesa verticalmente la corteza cortando el basamento, se cree que los cabalgamientos de la Cordillera Oriental convergen en profundidad hasta esta falla (Taboada et al., 2000; SGC, 2016).

Sobre la Ciudad de Bucaramanga, limitando los sedimentos constituidos por los abanicos aluviales del Plio – Pleistoceno (De Porta, 1958; Jiménez et al., 2015), se encuentra la Falla Suárez, e inclinados hacia ésta y bajo los sedimentos, se hallan la columna Jurásica y Cretácica. Según Julivert (1958), esta falla es vertical, representando en sus cortes

geológicos, estratos de crecimiento en los abanicos aluviales adosados al pliegue de deformación, reflejando coetaneidad de la sedimentación con el plegamiento. La Falla de Suárez es compleja y de comportamiento normal, que se puede asociar a un ramal secundario de la Falla de Bucaramanga (SGC, 2016). Se cree que existe una falla extensional más profunda que limita el este de la cuenca Jurásica, debido a que sería la forma de explicar su prolongación hasta el flanco oriental del anticlinal de Cobardes.

Hacia el oeste se encuentra los Cabalgamientos de Cobardes, Lebrija y de La Salina, los cuales conforman una imbricación que levanta el basamento y lo pone en superficie (aflorando), sobre la cuenca del VMM, terminando en contacto con la Falla de Lebrija, donde inicia el Sinclinal de Nuevo Mundo y los depósitos cenozoicos. Moviéndose más al oeste, sobre el flanco corto de Nuevo Mundo, correspondiente a la propagación de la rampa de la falla La Salina del Cabalgamiento de La Salina, se encuentra el anticlinal de Las Monas (Rodríguez L. et al., SGC, 2016). Hacia el cual disminuyen su espesor las formaciones cenozoicas.

El Bloque de Sabana de Torres, como se mencionó, es un bloque plegado de edad Jurásica y Cretácica, conformando un anticlinal entre los cabalgamientos opuestos de la Salina y Cáchira, la cual es cubierta por el paquete rocoso del Terciario.

Avanzando más al oeste, se encuentra el Cabalgamiento de Cáchira, que fue explicado en el perfil anterior (2), y la Flor de Cocuyo, que corresponde a una falla en flor positiva que levanta los bloques Jurásicos y cretácicos en el flanco monoclinal de San Lucas, a manera de estructuras en arpón (Bustamante E. J., 2016), cuya deformación es Pre-Andina y que fue decapitada por la erosión y rellenada con los sedimentos que conformaron la discordancia del Eoceno medio. Estas estructuras se extienden hasta la Falla de Cimitarra, que es una falla de alto ángulo con buzamiento al oeste, mostrando fallamiento inverso en las secuencias Jurásico-Cretácicas, las cuales desaparecen contra la discordancia del Eoceno.

Los paquetes del Terciario evidencian plegamientos muy suaves, conformando anticlinales y sinclinales muy amplios pero cuyo origen de plegamiento es pasivo, diferenciándolos de los que subyacen la discordancia del Eoceno medio, cuyas fallas tuvieron una ligera activación.

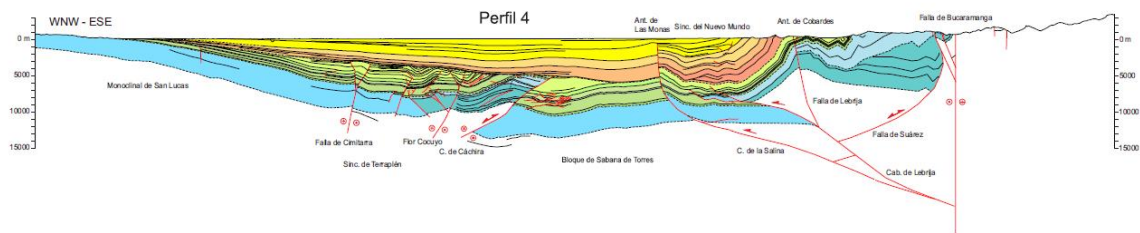


Figura 3-10 Perfil 4. Esta transecta tuvo un cubrimiento de líneas sísmicas 2D limitado, en la región centro oriental se incorpora la línea SPR-1997-1250, que cubre un segmento del sinclinal de Nuevo Mundo, para lo demás, la interpretación de esta región fue establecida en su momento con base en la geología de superficie.

La explicación de este perfil geológico es muy similar a las detalladas en las secciones previas 2 y 3, desde la falla de Bucaramanga al Este, hasta el Monoclinal de San Lucas al Oeste.

Lo resaltante es respecto a la mayor inclinación del paquete cenozoico en el margen oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo y que la Falla de Bucaramanga está contigua a la falla de borde de un semigraben de edad Jurásica, que se correspondería a una falla ancestral de Suárez (Rodríguez L. et al., SGC, 2016).

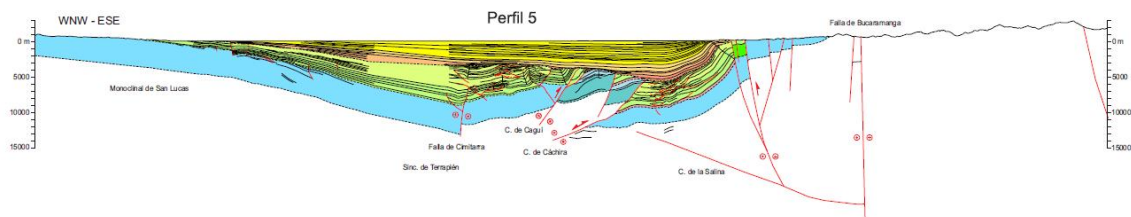


Figura 3-11 Perfil 5. El perfil cubre 152 Km lineales. En la región central se encuentra el alto de basamento pre-Cretácico Cágüi; afloran también algunas formaciones Jurásicas. Para el ajuste de esta transecta, se proyectaron los pozos San Alberto-1 y Toca-1.

En esta sección el cabalgamiento de La Salina, no afecta la columna rocosa, sino el movimiento inverso sobre las fallas de alta inclinación, el monoclinado creado, pliega las formaciones del Cenozoico inferior. El Cabalgamiento de Cáchira, que es opuesto al de La Salina, produce un alto de inversión de la cuenca jurásica en forma de arpon, en la sísmica se observa que este anticlinal está cortado por una falla sintética (falla subsidiaria de una mayor que forma un ángulo bajo con ella y presenta el mismo sentido de desplazamiento), a la de Cáchira que en la bibliografía se conoce con el nombre de Falla de Cágüi (Garabito C., 2008). Un poco más al oeste, se encuentra la Falla de Cimitarra que es una falla lateral, que en la parte superior presenta forma de flor negativa y que en este corte atraviesa el Sinclinal de Terraplén (García S. J., Alvarado H. et al., 2015).

El Monoclinal de San Lucas, presenta la misma geometría que en las secciones previas, con una truncación de toda la secuencia Cretácica y Cenozoica hacia el noroeste, donde se presenta una serie de pliegues suavizados en forma de anticlinal entre las fallas Cagüí y Cimitarra que son flanqueados por estructuras sinclinales rellenas con sedimentos basales del Cenozoico inferior (Fm. La Paz y Fm. Esmeraldas).

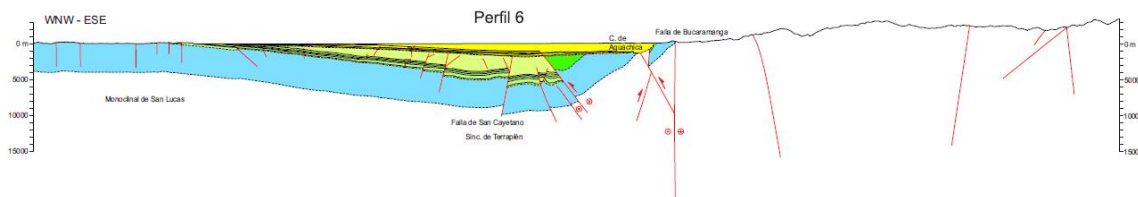


Figura 3-12 Perfil 6. Cuenta con orientación NW-SE y tiene una longitud de 152 Km, es el que se encuentra más al norte de la zona investigada por el SGC en 2016; el costado Este de esta transecta, se encuentra sobre la Cordillera Oriental y no tenía cubrimiento sísmico 2D, por lo que fue necesario utilizar la información cartográfica de superficie. Sobre este perfil fueron proyectados los pozos Trigos-1, Alamo-1, Totumal-1 y Reses-1.

Iniciando al Este de la sección, lo más destacable es la Falla de Bucaramanga y sus fallas subsidiarias que conforman el Cabalgamiento de Aguachica, creando una estructura en flor positiva que levanta el Jurásico y el Cretácico en un monoclinal, sobre el fondo del Sinclinal de Terraplén, formando un bloque rotado que pliega los estratos del Grupo Real, el resto de la secuencia está truncada bajo la discordancia del Eoceno, indicando que la elevación y rotación del basamento de la Cordillera Oriental fue anterior al Eoceno durante la fase de deformación Pre-Andina (García S. J., et al, 2015).

Un poco más al oeste, se encuentra el Sinclinal de Terraplén, que como se ha mencionado, es un sinclinal disimétrico de perfil suave, que contiene toda la secuencia estratigráfica del Valle Medio del Magdalena, hacia el lado oriental más corto se encuentran unas fallas (la más destacable la Falla de San Cayetano) de alto ángulo que cortan el sinclinal, pero quedan interrumpidas bajo la discordancia del Sub-Eoceno medio (SGC, 2016). El Sinclinal de Terraplén hacia el oeste se convierte en el Monoclinal de San Lucas, que es cortado a lo largo de su extensión, por varias fallas de ángulo alto a totalmente verticales, que en su mayoría se fosilizan contra la discordancia del Sub-Eoceno medio. Según García S. J., 2015 “con excepción de un cabalgamiento dirigido hacia el oeste que desplaza al Grupo Real” (SGC, 2016).

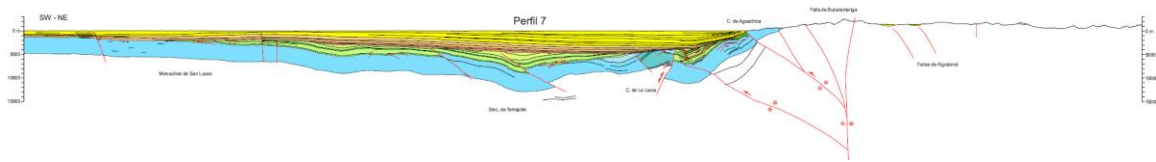


Figura 3-13 Perfil 7. Es la sección regional con mayor cubrimiento longitudinal en dirección SW-NE, posee una longitud de 239 Km, su costado nororiental finaliza en la Cordillera Oriental más allá de las Fallas de Algodonal. Sobre esta sección fue proyectado el pozo Punta Piedra-2.

Partiendo del Este, se observa en el perfil las Fallas de Algodonal y la Falla de Bucaramanga. Esta transecta permite visualizar la gran estructura en flor positiva de la Falla de Bucaramanga, que se debe a la preservación de los restos de conglomerados de los conos aluviales de la Formación Algodonal que son elevados más de 2 Km sobre los estratos del Grupo Real, dentro de la Cuenca del Magdalena. La Fm. Algodonal está preservada en dos pequeños sinclinales formados sincrónicamente por la actividad de las Fallas de Algodonal. La mayoría de los cabalgamientos oblicuos-inversos que forman la Flor de Bucaramanga están dirigidos hacia el VMM siendo el más importante el Cabalgamiento de Aguachica, que pone a aflorar las rocas del Jurásico (Fm. Girón) por encima de la secuencia Cenozoica del Grupo Real (Alvarado H. et al., 2016).

Al norte de la traza de esta sección (cerca de la Ciudad de Aguachica, Cesar), la falla modifica la forma de los abanicos aluviales y coluviales de edad Plio - Pleistocena. Los conglomerados y arenitas que forman las facies del núcleo de los abanicos están plegados en cuñas de rotación desde una disposición vertical hasta horizontal, presentando discordancias angulares internas (García S. J. et al., 2015).

Más al SW, se encuentra el bloque sinclinal entre los cabalgamientos de Aguachica y de La Llana, el cual se sitúa en los bloques inferiores de dichos cabalgamientos; el cual es truncado por la discordancia Sub-Eocena que es la que controla la preservación de la serie Cretácica, más potente cerca del cabalgamiento de La Llana y más delgada en el flanco del Cabalgamiento de Aguachica. Todas las secuencias jurásicas y cretácicas se encuentran duplicadas por cabalgamientos secundarios que cortan con bajo ángulo la estratigrafía de la zona.

Continuando sobre la transecta se observa el Cabalgamiento de La Llana, que es un importante cabalgamiento de alto ángulo dirigido hacia el NE y cuya extremidad superior termina bajo la discordancia del Sub-Eoceno medio (SGC, 2016). El bloque superior es un gran anticlinal truncado con hiato del Cretácico completo en su cresta. Es importante resaltar que la sísmica en esta sección muestra con claridad la divergencia de los estratos del Jurásico hacia el Cabalgamiento de La Llana, Según García S. J. et al. 2015, este dato “refuerza la interpretación general, de que el cabalgamiento ha reactivado una falla heredada que forma la pared de un semigraben Jurásico” (ANH, 2018). Esta estructura es de tipo arpon de inversión y el Cabalgamiento de La Llana se puede comparar, por lo tanto,

al cabalgamiento de Cáchira, pero la orientación NNW-SSE del C. de La Llana es perpendicular al del Cabalgamiento de Cáchira (García S. J. et al., 2016).

Un poco más al SW, el bloque superior del Cabalgamiento de La Llana se conecta con el sinclinal de Terraplén, el cual está definido por los estratos bajo la discordancia del Sub-Eoceno medio, pues las capas sobre la discordancia no se encuentran plegadas. En la zona se interpretaron dos cabalgamientos menores dirigidos hacia el SW, que cortan al sinclinal cerca a la charnela y no rompen la discordancia del Eoceno medio. Ya al final de la sección, el flanco suroccidental del sinclinal del Terraplén se convierte gradualmente en el Monoclinal de San Lucas (SGC-ANH, 2016). Este perfil muestra el pinchamiento de las secuencias del Cretácico sobre la Serranía de San Lucas, y la disposición del Cenozoico sobre el Jurásico de la misma serranía (Alvarado H. et al., 2016).

Finalmente, el Cenozoico se encuentra no deformado sobre su discordancia basal, la cual está basculada al oeste en el frente de la Cordillera Oriental, acuñando las secuencias del Eoceno contra el paleo-relieve. En las secciones sísmicas se observa que los reflectores correspondientes al Grupo Real, también se adelgazan y convergen hacia la Cordillera Oriental, existiendo una discordancia angular interna que indica que la elevación en su margen, ocurrió durante la sedimentación de los estratos más recientes del Grupo Real en el Mioceno (García S. J. et al., 2015).

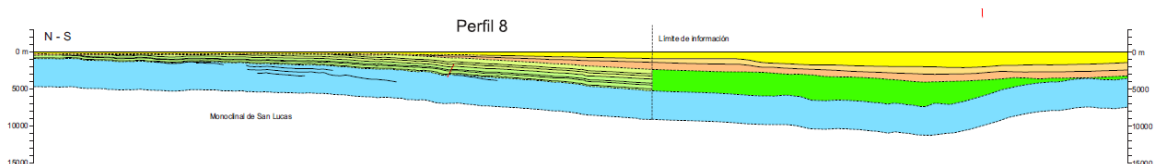


Figura 3-14 Perfil 8. Este perfil tiene orientación longitudinal N-S con 148 Km de longitud, las líneas punteadas que se observan en la sección, principalmente en la zona sur del perfil (línea del límite de información), corresponde a la interpretación resultante de la extrapolación de los puntos de intercepción con las líneas sísmicas adyacentes.

La transecta No. 8 está situada longitudinal y sub-paralela, con algunos cruces al cauce del Río Magdalena, es una sección con orientación N-S, que es casi paralela también, al flanco del Monoclinal de San Lucas. En general es un perfil geológico muy elemental, con un pinchamiento de los estratos hacia el norte. Por debajo de la discordancia del Eoceno medio, se encuentra un anticlinal, que está precisamente en la dirección en que se trunca todo el Cretácico. Sobre las secciones sísmicas 2D, se identificaron algunas fallas de alto grado. La columna cenozoica presenta una estratigrafía más completa y potente, sobre la zona de charnela del sinclinal, ubicado al sur del perfil (Alvarado H., et al., 2016).

3.2 Estratigrafía del Sector Centro – Norte del VMM

Según Sarmiento et al., (2015). La relación entre las unidades del Cretácico y las rocas pre-cretácicas para el sector norte del Valle Medio del Magdalena es inconforme y se caracteriza por un faltante estratigráfico desde el final de los depósitos volcano-sedimentarios del Jurásico a los primeros registros del inicio de la sedimentación, hacia el Hauteriviano Superior. Al Sur de la Falla de Cimitarra, formando parte del Sinclinal de Nuevo Mundo, aflora en el flanco Oriental de dicha estructura la sucesión completa, permitiendo observar en los afloramientos, la mega secuencia cretácica y terciaria, limitada por inconformidades regionales, sin que sea evidente el desarrollo de discordancias angulares a la base y al techo. (Geología Norandina No. 12, 2015).

Cada período de evolución de la cuenca del VMM presenta una secuencia sedimentaria característica y los límites entre estas secuencias deposicionales se encuentran definidas por inconformidades (discordancias angulares) de escala regional, tales como las del Paleozoico-Jurásico, Jurásico-Cretácico (Sub-Cretácica) y la Cretácico-Terciaria (Sub-Eoceno). La secuencia litológica en el VMM se inicia con el basamento ígneo-metamórfico (Proterozoico) en su parte basal, que fue llenándose con sedimentos hasta los más jóvenes de edad Plioceno-Holoceno. En la cuenca se han interpretado 3 secuencias de primer orden (García S. J., 2014), sedimentadas sobre rocas ígneas y metamórficas de edad pre-cretácica. La primera, fue sedimentada en ambientes continentales a marginales durante un rift intracratónico durante el Triásico y comienzos del Jurásico; la segunda, ocurrida durante el Jurásico-Cretácico, sedimentada en ambientes fluviales y litorales, durante una fase de extensión producto de un rift de retro-arco (Alvarado, H., et al., 2015), y la tercera, identificada como la secuencia Cretácico-Paleoceno, sedimentada en condiciones marinas, durante un proceso tectónico de subsidencia termal (Etayo et al., 2003).

Es en este sector donde Morales et al., (1958), compilan y proponen la mayor parte de las localidades tipo de las unidades que conforman el Mesozoico y el Cenozoico del VMM. A partir de este afloramiento, no sólo se ha extendido a nivel regional la nomenclatura litoestratigráfica, sino, que adicionalmente es un punto para establecer las variaciones principales de las mismas en la Cuenca del Catatumbo y la parte media de la Cordillera Oriental. Muchos autores han utilizado dicho referente para las correlaciones regionales

que de manera amplia representan un macro - ciclo transgresivo - regresivo (Fabre, 1985; Villamil, 1993; Sarmiento et al., 2006), con cambios correspondientes a ciclos de escalas menores y estos a su vez asociados a los episodios orgánico genéticos, en los que se constituyeron los campos de generación y auto producción de hidrocarburos, (Sarmiento et al., 2015).

Según Sarmiento et al., (2015), las variaciones litológicas hacia la parte Norte del VMM, las unidades del Cretácico no se apartan de las descripciones originalmente descritas por Morales et al., (1958), tal cual se logra deducir de los escasos reportes litológicos de superficie y de los pozos que han cortado parcialmente dichos intervalos, (Geología Norandina No. 12, 2015).

Finalmente, y de acuerdo a la bibliografía, durante el proceso de rifting de la cuenca, fue sedimentada la secuencia conformada por las Formaciones Bocas, Noreán y Girón (ANH, 2016). Posteriormente durante la fase de subsidencia termal (Etayo et al., 2003), se depositaron las Formaciones Cumbre, Rosablanca, Paja, Tablazo, Simití y la Formación La Luna. El ciclo sedimentario culminó con un periodo tectónico compresivo (Paleoceno-Eoceno) que generó elevaciones estructurales y posteriormente grandes procesos erosivos que afectaron enormemente la parte superior de la secuencia cretácica (García S. J., et al 2015). Para finalmente depositarse de manera discordante las formaciones del Paleógeno tardío (formaciones La Paz y Esmeraldas), coincidiendo con el inicio de la inversión estructural, para posteriormente depositarse las Formaciones Mugrosa y Colorado (Morales et al., 1958), en un evento constante de crecimiento de las estructuras. Al final de la inversión estructural, durante el Neógeno, se depositaron los sedimentos del Grupo Real; y al final como relleno cuaternario, se asentaron los sedimentos volcano-sedimentarios sueltos del Mioceno superior al Plioceno-Pleistoceno, que conforman actualmente el Grupo Mesa (Morales et al., 1958).

A continuación, se presenta una descripción de las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio al centro-norte del Valle Medio del Magdalena, VMM, (Ver Mapa Geológico y Columna estratigráfica del sector centro norte de la zona de estudio, Figuras 3-5 y 3-16).

3.2.1 Formación Bocas

Unidad sedimentaria constituida por una alternancia de arenitas y lodolitas abigarradas, con intercalaciones aisladas de calizas y algunas capas de tobas y lavas de composición intermedia, que guarda equivalencia litológica con la Fm. Morrocoyal (Geyer, 1969 y Clavijo, 1996).

3.2.2 Formación Noreán

Según Correa-Martínez et al. (2019), La Formación Noreán fue definida por Clavijo en 1995 como una unidad volcanoclástica; por otra parte, Gonzáles et al. (2015), la denominan Complejo Volcánico de Noreán.

La Formación Noreán fue descrita en los alrededores del caserío de Noreán, de donde deriva su nombre, en el sur del Departamento del Cesar. La localidad tipo se ubica en la carretera Buturama-Bombeadero (Clavijo, 1995). La unidad corresponde a una sucesión potente de rocas volcano-sedimentarias aflorantes, desde seudoestratificada a bien estratificada, con interdigitaciones comunes entre los conjuntos litológicos (Royero, 1996).

La Formación Noreán consta de tobas, lodolitas, areniscas tobáceas (andesíticas-dacíticas), silos porfíricos y diques.

3.2.3 Formación Rosablanca

La Formación Rosablanca proviene del Cerro Rosa Blanca cerca al municipio del Tablazo, propuesta inicialmente por Morales et al., (1958), está compuesta por calizas terrígenas conglomeráticas, micritas, esparitas, bioesparuditas y bioesparitas con intercalaciones lodosas; conformando parte del flanco Este del Sinclinal de Nuevo Mundo (Renzoni, 1985 y Sarmiento et al., 2015). En general se trata de una Formación fosilífera, muy rica en moluscos, que se reduce en espesor hacia el norte del VMM, en cercanías de los municipios de Aguachica, Gamarra y Morales en los departamentos del Cesar y Bolívar (Clavijo, 1996). La Formación Rosablanca, ha probado ser una roca fuente para hidrocarburos no convencionales, de acuerdo a estudios de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH, en el año 2012.

3.2.4 Formación Paja

Deriva su nombre de la Quebrada Paja, afluente del Río Sogamoso (Morales et al., 1958), constituida por lodolitas físciles ligeramente calcáreas, con intercalaciones de biomicritas, en ocasiones concreciones calcáreas diagenéticas (Sarmiento et al., 2015), con ambiente de depósito de mar abierto, con poco aporte terrígeno continental, igual a la Formación Rosablanca, disminuye en espesor al norte del VMM. Al parecer el tope de esta Formación, corresponde a un evento regresivo de escala regional que coincide con el Aptiano tardío.

3.2.5 Formación Tablazo

La Formación Tablazo, fue propuesta por Morales et al., (1958), con el objetivo de definir un conjunto de calizas fosilíferas masivas, (Sarmiento et al., 2015) que está compuesta por calizas biomicritas y bioesparitas, intercaladas con lodolitas calcáreas. Al norte del VMM el depósito de esta Formación es muy incierta, por lo que muchos autores consideran que no se acumuló en ese sector de la cuenca, (Clavijo, 1996 y Mantilla et al., 2006). Se estima una edad entre el Aptiano superior y el Albiano inferior, por comparación con las formaciones infra y suprayacentes, (Clavijo, 1996). La plancha No. 75 - Aguachica, contiene un error con esta Formación, debido a que fue descrita y cartografiada, cuando en realidad se trata de la Formación Rosablanca (la Formación Tablazo no reporta presencia de amonitas), (Sarmiento et al., 2015). Al igual que Rosablanca, esta Formación probó ser una roca fuente para hidrocarburos no convencionales, (ANH, 2012).

3.2.6 Formación Simití

Descrita también por Morales et al., (1958), agrupa las rocas expuestas en afloramientos de la Ciénaga de Simití, al aparecer el contacto con la Formación Tablazo es una paraconformidad (Mantilla et al., 2006), pero existen muchas dudas que hacen evidente el desconocimiento estratigráfico del Cretácico al norte del VMM, (Sarmiento et al., 2015). Está constituida por lodolitas físciles macizas en un 70% (Mantilla et al., 2006), con intercalaciones de calizas lumaquéllicas, impregnadas de aceite y areniscas calcáreas, hacia el techo con capas de amonitas del Albiano medio y en algunas capas concreciónales se encuentran amonitas del Albiano superior (Morales et al., 1958).

3.2.7 Formación Calizas del Salto

Las Calizas del Salto fue propuesta por Morales et al. (1958) como Salto limestone, para agrupar un conjunto de calizas aflorantes en el VMM entre la Formaciones Simití y La Luna, la cual mencionaba tener gran extensión. La localidad tipo está ubicada en la Quebrada el Salto cerca al campo de petróleo Totumal, en cercanías del municipio de Aguachica en el Cesar. Está compuesta por bioesparitas, biomicruditas muy cementadas de conchas de bivalvos y amonitas con intercalaciones de biomicritas (Sarmiento et al., 2015). Es de anotar que esta Formación no es mencionada en la plancha geológica No. 75, ni en publicaciones más recientes de Clavijo en 1996, Mantilla, 2006, Barrero, 2007 y Sarmiento 2011; lo que hace pensar que se trate de una Formación con interpretación incierta, con afloramientos sólo en partes de la cuenca, (Mantilla, 2006). El rango de edad reportado con base en fósiles es del Albiano superior al Turoniano (Guerrero et al., 2000 y 2002). Esta Formación no ha sido lo suficientemente estudiada en el VMM y debe ser diferenciada de las Formaciones Simití y La Luna (Sarmiento et al., 2015).

3.2.8 Formación La Luna

Inicialmente llamada La Luna Limestone por Morales et al., (1958), fue correlacionada por la industria petrolera de unas rocas aflorantes en la Serranía del Perijá en Venezuela

(Hedberg et al., 1931 y 1937), las cuales tienen las mismas características litológicas que las halladas en el VMM. Esta Formación está subdividida en los Miembros Salada, Pujamana y Galembo y ha sido también extendida a otras áreas y cuencas del territorio (Sarmiento et al., 2015). Está compuesta principalmente por lodolitas calcáreas y calizas biomicritas con intercalaciones de chert negro, con presencia de limolitas, micritas y lodolitas calcáreas y silíceas (Zumberge, 1984). Esta Formación es muy importante, debido a las pruebas de generación y acumulación de recursos hidrocarburíferos convencionales y no convencionales (ANH, 2012 y Sarmiento et al, 2015).

3.2.9 Formación Umir

Según Rangel et al. (2002), La Formación Umir fue designada originalmente por Huntley en 1917 en un informe no publicado (Julivert, 1968), fue redefinida por Link (1925), en otro informe tampoco publicado, quien además le dio su definición actual (Guerrero J., 2018), para finalmente ser descrita por Morales et al., (1958), su localidad tipo se describió en la quebrada del mismo nombre, afluente del Río Oponcito, en la vía Barrancabermeja - San Vicente de Chucurí, sector suroccidental del Sinclinal de Nuevo Mundo, en el Departamento de Santander. En forma general se define como un conjunto de lutitas grises a negras, carbonosas, micáceas, con concreciones ferruginosas e intercalaciones cada vez más abundantes hacia el techo de areniscas líticas, limolitas grises y presencia de mantos explotables de carbón. El espesor se ha calculado entre 1.000 m y 1.400 m y reposa en contacto neto sobre biomicritas fosfáticas limosas del Miembro Galembo de la Formación La Luna, aunque algunos autores la reportan en discordancia angular de bajo ángulo (Rangel et al., 2002). Esta unidad no presenta afloramientos en el sector Norte del VMM, pero si es cortada en el subsuelo por varios pozos exploratorios, su descripción se hará con base en afloramientos del Sinclinal de Nuevo Mundo, (Tomando de Sarmiento et al., 2015).

La Formación Umir es una unidad que se destaca, tanto por el apreciable espesor acumulado como por el contrastante cambio litológico y composicional que la caracteriza. Aunque en su gran mayoría son lodolitas grises, son comunes las intercalaciones de arenitas y capas de carbón que se hacen más frecuentes hacia la parte media superior, donde se reconocen mantos explotables. Las areniscas de base a techo presentan composicionalmente aumento de los componentes líticos variando de sublitoarenitas a litoarenitas, siendo las partículas líticas predominantes en clásticos volcánicos y metamórficos de bajo grado (Guerrero, 2011; Sarmiento et al., 2015).

Lo anterior demuestra el inicio del aporte de terrígenos desde el Occidente correspondientes a la apertura del levantamiento de la Cordillera Central (Gómez et al., 2003; 2005) y a la consecuente conformación de ambientes someros, a manera de mares restringidos con ocasionales desarrollos de áreas pantanosas con los respectivos depósitos de materia orgánica, posteriores formadores de mantos de carbón. Las facies arenosas más recurrentes en la parte superior de la unidad al igual que la aparición de lodolitas verde azulosas, sustentan la conformación de pantanos asociados a áreas próximas costeras y restringidas, (Sarmiento et al., 2015).

Julivert (1968) había asignado una edad Cretácica Superior (Campaniano-Maastrichtiano) a la Formación Umir, posteriormente nuevos análisis restringieron la edad al Maastrichtiano para la parte media y superior de la misma Formación, con base en la asociación palinológica, representada por *Dinogymnium acuminatum*, *Buttinia andreevi*, *Proxapertites humbertoides*, *Echimonocolpites protofranciscoi*, *Magnotetradites magnus*, *Tetradites umirensis* y *Echitriporites trianguliformis*. El Maastrichtiano medio a tardío había sido asignado con foraminíferos por Tchegliakova (1993), por la presencia de *Rugoglobigerina macrocephala* y *Ammobaculites colombianus* para la parte media y superior de la unidad, (Sarmiento et al., 2015).

Resumiendo, la Formación Umir está constituida por arcillolitas, areniscas de grano fino a medio, con algunas intercalaciones de limolitas y mantos de carbón.

Esta unidad no se ha encontrado todavía aflorando en el área de estudio, sin embargo, se tienen datos de su presencia en el subsuelo en los pozos perforados por Ecopetrol: Buturama-2, El Crisol-3, Pital-1, Pital-2 y Norean-1 (Ingeominas, 1996), recientemente ha sido reconocida en campo, en cercanías del Municipio de Aguachica, pero no fue realizada su cartografía, debido a que el objetivo del estudio era para la Formación La Luna (Comunicación oral por parte del geólogo Oscar Romero, SGC, 2019). También ha probado ser una roca fuente para hidrocarburos no convencionales (ANH, 2012).

3.2.10 Formación Lisama

Corresponde a capas irregulares de conglomerados, lodolitas multicoloreadas, con intercalaciones de arenitas con estratificación ondulosa y cruzada y con algunos mantos

de carbón menos competentes que los de la Formación Umir, fue definida inicialmente por Link (1925), con localidad tipo en la Quebrada La Lisama, que tributa al Río Sogamoso (Morales et al., 1958). La edad de la Formación a partir de palinología es Paleoceno Tardío (Pardo et al., 2009), la Formación va desde ambientes costeros y eventos de gran energía, ambientes transicionales asociados a sistemas costeros con canales y áreas pantanosas a sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos meándricos en la parte superior de la Formación (Moreno et al., 2011). Según Nie et al. (2012), se cree que la Formación Lisama corresponde a la transición de ambiente marino somero de Umir a depósitos deltaicos y de planicies aluviales (Sarmiento et al., 2015).

3.2.11 Formación La Paz

Compuesta por conglomerados y areniscas conglomeráticas con clastos de la Formación La Luna, con intercalaciones de arcillolitas de varias tonalidades, fue descrita por Morales y otros en 1958, a partir de trabajos de la industria petrolera, cuya localidad tipo se encuentra en el Sinclinal de Nuevo Mundo. Su litología corresponde a ambientes de alta energía asociados a abanicos aluviales y de ríos trenzados a llanuras de inundación. La edad de la Formación La Paz es Eoceno Medio a Tardío, con base en palinomorfos y granos de polen, entre otros (González Guzmán A. E., 1967).

3.2.12 Formación Esmeraldas

También definida por Morales (1958), Está constituida por areniscas de grano fino con intercalaciones de limolitas y arcillolitas y reposa en discordancia angular con las unidades del Cretácico Superior (García S. J., 2016). El ambiente de Formación corresponde a sistemas fluviales con llanuras aluviales y canales meandriformes, que varían a llanuras lacustres con influencia marina, con presencia de fósiles de bivalvos, gasterópodos y fragmentos de plantas (Caballero et al., 2010). La edad de acuerdo a palinología es Eoceno Tardío (Sarmiento et al., 2015).

3.2.13 Formación Mugrosa

Nombre introducido por Gill (En Morales et al., 1958) y descrita por Caballero et al. (2010), consta de lodolitas varicoloreadas intercaladas con areniscas de grano medio a fino y ocasionalmente grueso a conglomerático. Toma su nombre de la Quebrada La Mugrosa y

sobre la cuenca del VMM se reporta un horizonte fosilífero llamado La Cira, el cual no aflora en el Sinclinal de Nuevo Mundo. El ambiente corresponde a sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos con canales meándricos, disminuyendo en espesor hacia el sector norte de la cuenca. La edad se considera Eoceno superior a Oligoceno inferior. Es una de las unidades más productivas de petróleo en la Concesión De Mares. La Formación Mugrosa se correlaciona con la Formación Mugrosa definida por los geólogos de Ecopetrol y de Shell y con la parte inferior del Grupo Chuspas de las compañías Socomy y Richmond (Ballesteros C. & Parra J., 2012).

3.2.14 Formación Colorado

Toma su nombre del Río Colorado al sur del Sinclinal de Nuevo Mundo en el Campo Cira Infantas, incluye el horizonte fosilífero La Cira y aumenta en espesor hacia la Cordillera Oriental (Morales et al., 1958) está compuesta por una alternancia de lodolitas con areniscas conglomeráticas y conglomerados (Sarmiento et al., 2015), presenta también arcillolitas carbonáceas. Al parecer es una sucesión estrato creciente con facies de tipo abanicos aluviales y ríos trenzados, su edad ha sido asignada al Oligoceno tardío al Mioceno Temprano (Caballero et al., 2010).

3.2.15 Grupo Real

Definida por Morales et al. (1958), se refiere a la unidad del Neógeno, cuya localidad tipo se encuentra en la desembocadura de la Quebrada Real sobre el Río Opón. Está constituida por lodolitas arenosas abigarradas, areniscas conglomeráticas y algunos conglomerados con intercalaciones de arcillolitas, en algunos sectores de la unidad se presenta areniscas tobáceas. Es una unidad muy potente (≈3430 metros), 30 metros de conglomerados, 500 metros de areniscas con estratificación cruzada, 1300 metros de lodolitas, 1100 metros de areniscas con fragmentos de troncos silicificados o carbonizados (Sarmiento et al., 2015) y 500 metros de lodolitas multicoloreadas con intercalaciones de areniscas. Su relación con la Formación Colorado es discordante. La edad actual para el Grupo Real se ha ajustado al Mioceno Tardío (Sarmiento et al., 2015).

3.2.16 Grupo Mesa

Según Morales et al. (1958), todos los sedimentos del Mioceno superior, que guardan semejanza con la Formación Mesa fueron agrupados como un solo conjunto (Sarmiento et

al., 2015). Esta formación se encuentra al sur del VMM y su nombre deriva de las geoformas a manera de mesetas que fueron producidas por erosión. Corresponde a unos 575 metros que suprayacen al Grupo Real de acumulaciones volcano-sedimentarias de areniscas y tobas andesíticas, aglomerados volcánicos y depósitos piroclásticos (pumitas y cenizas). Los clastos corresponden a rocas volcánicas de tipo andesitas y dacitas. La parte superior del Grupo Mesa, está compuesto por gravas y bloques de ambientes de alta energía, que representan abanicos torrenciales. Su edad se encuentra entre el Plioceno y el Pleistoceno (Sarmiento et al., 2015).

3.2.17 Depósitos Cuaternarios

La zona de estudio, se encuentra cubierta por una espesa capa de depósitos cuaternarios de tipo fluviales de canal (Qfc), Fluvio-lacustres de ciénagas y pantanos (Qfl), de llanura de inundación (Qfal), abanicos aluviales y terrazas (Qcal), (Cooper, M. et. al., 1995).

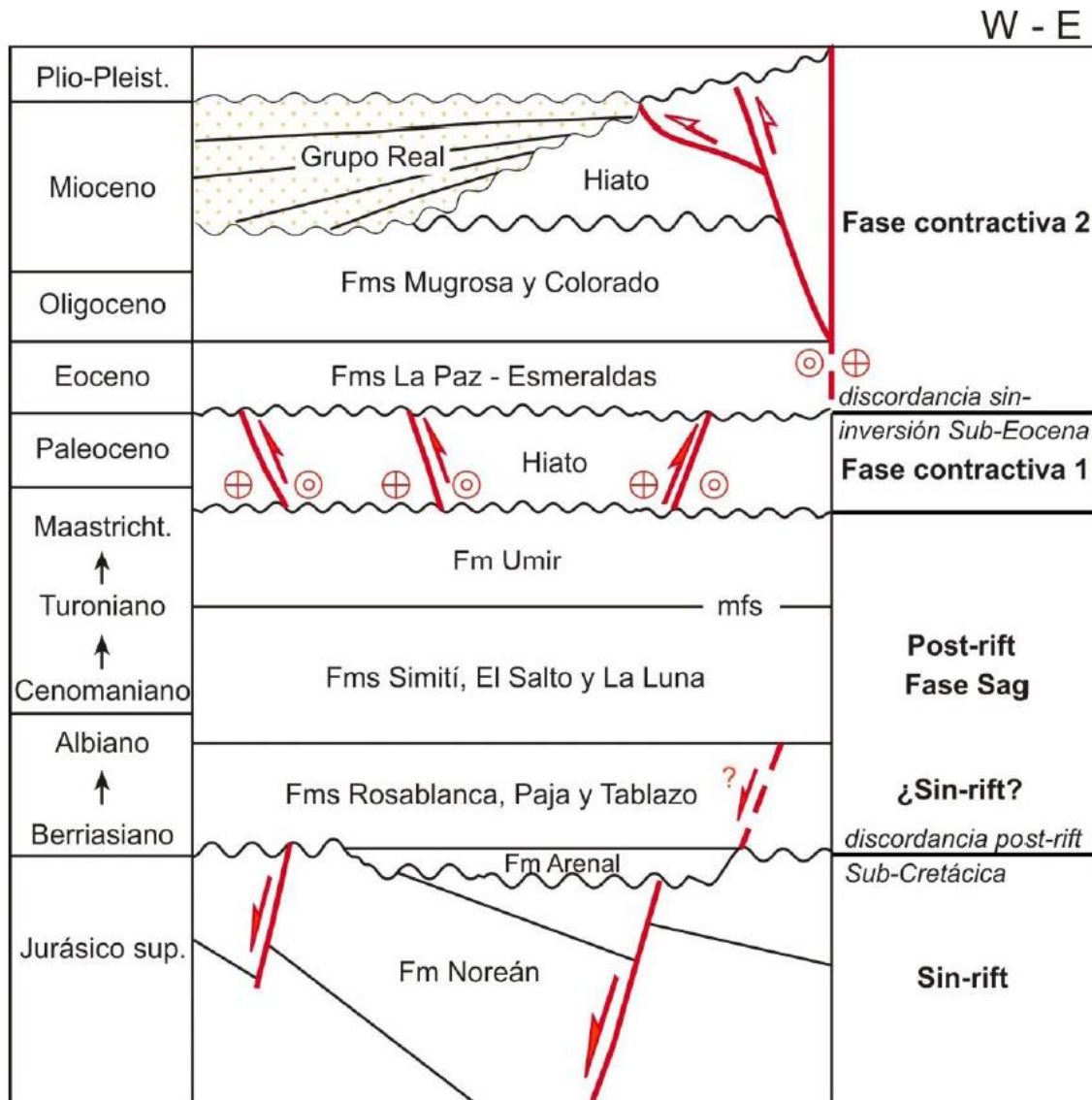


Figura 3-15 Cronoestratigrafía de la cuenca del VMM mostrando las principales secuencias tectono-estratigráficas y las fases de deformación (Tomado del Informe Técnico-1, Estructura Geológica del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena, IGME).

Como conclusión, Según Cepcolsa (2013), la estratigrafía del área de estudio está restringida a un Paleozoico sobre el cual reposan discordantemente secuencias sedimentarias del Cretáceo superior y del Terciario. En los pozos analizados, se observaron rocas del Cretáceo, Paleógeno y Neógeno, tal y como se muestra en las columnas generalizadas del área de estudio (Figura 3-15 y 3-16). Cada estadio de evolución de la cuenca del VMM, está registrado con una columna sedimentaria propia. Estas secuencias de depositación se encuentran restringidas entre inconformidades

regionales incluyendo el Paleozoico-Jurásico, Jurásico-Cretácico (Sub-Cretácica) y Cretácico-Terciario (Sub-Eoceno). La siguiente columna representa la sucesión de las unidades del área de estudio, que incluyen las discordancias mayores, (SGC-ANH, 2016).

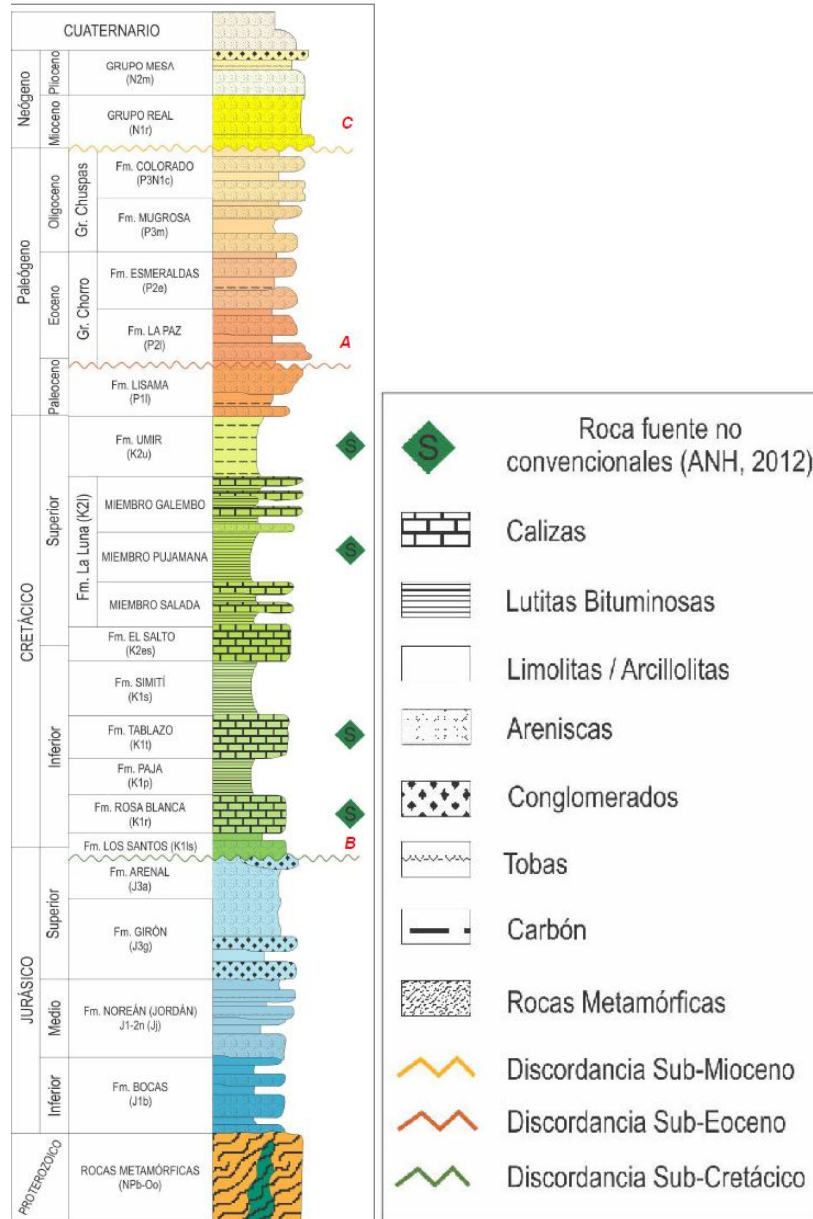


Figura 3-16 Columna estratigráfica actualizada del sector norte del Valle Medio del Magdalena. El cambio de sedimentación continental en el Jurásico a marino en el Cretácico y luego de marino en el Cretácico a continental en el Cenozoico, implicó cambios relativos del nivel del mar que son relacionables con la actividad tectónica regional (Modificada de Morales, 1958. SGC, 2019).

4.Marco Teórico

4.1 Interpretación Geológica y Sismoestratigráfica

El proceso de interpretación sísmica requirió un flujo de trabajo que permitiera la unificación de los dominios de tiempo y profundidad, para que se garantizara la mayor precisión de ubicación geoespacial de las estructuras y eventos geológicos.

La primera actividad consistió en el análisis y selección de los pozos exploratorios perforados en la cuenca del VMM, que tuvieran cercanía menor a 200 metros de las líneas sísmicas de cada programa de adquisición y pudiesen ser proyectadas a las secciones seleccionadas para interpretación y creación de las transectas.

Los pozos seleccionados fueron aquellos que tuvieron los registros eléctricos del set básico (GR, SP, RHOB, DT), con una profundidad de investigación mínima a las formaciones del Mesozoico y la definición de topes estratigráficos; de tal forma que se permitiera la calibración sísmica, a través de la construcción de sismogramas sintéticos (Figura 4-1 a 4-2). Los registros sísmicos (DT) se utilizaron para los análisis de velocidades y las conversiones a profundidad de las unidades mapeadas.

Con los pozos utilizados para los sismogramas sintéticos y los topes, se realizó la comprobación y la identificación de los principales eventos de la cuenca, sobre el área de estudio y se interpretaron hasta donde fue posible seguirlas, en las secciones sísmicas. Las principales interfaces de las líneas sísmicas seleccionadas, se basaron en sus amplitudes y continuidad, particularmente para aquellas zonas donde no se contaba con un control de pozos.

Los horizontes, se dibujaron sobre todas las líneas de rumbo y buzamiento, así como en sus intersecciones para asegurar la consistencia de la interpretación. Simultáneamente se fueron construyendo las transectas 2D/3D en sentido Este-Oeste y Norte-Sur, con el propósito de determinar los estilos estructurales del VMM. En la interpretación de las fallas, se trazaron las más evidentes sin recurrir a un modelo estructural particular o a la corrida de atributos que las resaltaran y se interrumpieron los trazos de los horizontes para marcar

los respectivos saltos de falla de cada bloque. Posteriormente, los contactos de falla fueron proyectados a superficie para la construcción de las trazas sobre los mapas y poder así, refinar los contornos (curvas de nivel).

Como se mencionó en un capítulo anterior, los reprocesamientos sísmicos utilizados en este trabajo correspondieron a Migraciones con filtros y ganancia (MIG I-I) y Pre-Stack Time Migration (PSTM por sus siglas en inglés). En las zonas de la cuenca, donde no se contó con estos reprocesos migrados, fue necesario cargar e interpretar las versiones estacadas con filtro y ganancia (STK I-I).

Desde el principio de las actividades de interpretación sismoestratigráfica se definió seguir los eventos de interés por el cero crossing de las impedancias acústicas, donde se marcan los contrastes de los coeficientes de reflexión positivos y negativos sobre las secciones sísmicas 2D.

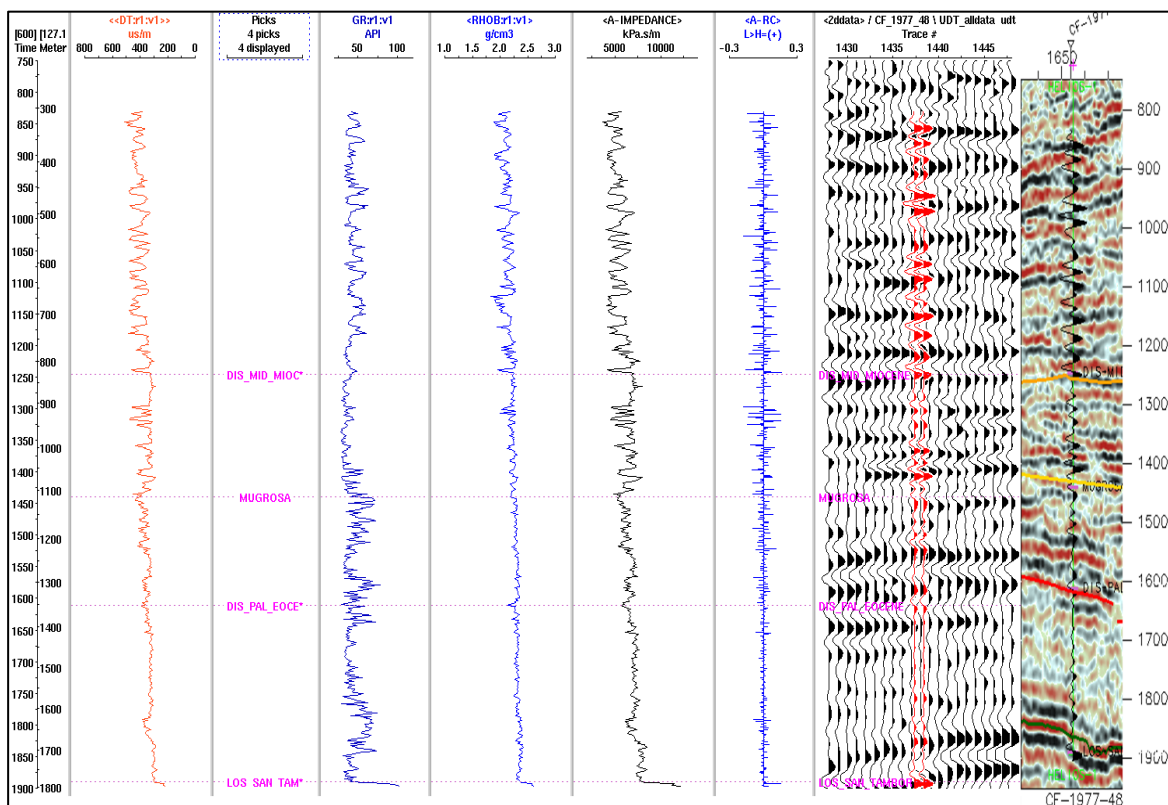


Figura 4-1 Construcción del sismograma sintético para el amarre sísmico de la línea CF-1977-48 con el Pozo Pavas-1, cerca de San Alberto, Cesar (SGC, 2014).

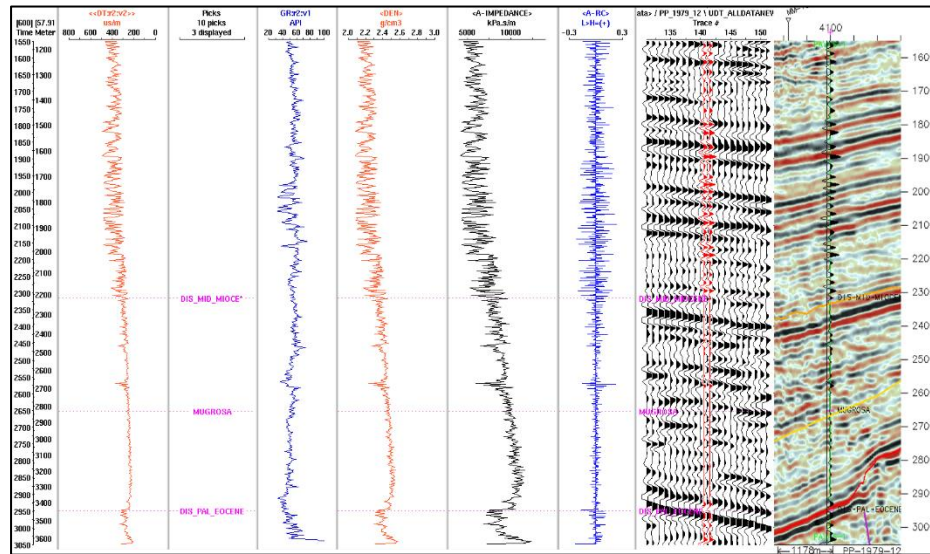


Figura 4-2 Construcción del sismograma sintético para el amarre sísmico de la línea PP-1979-12 con el Pozo Helios-1, cerca de Bajos de Campamento, límites Santander-Antioquia (SGC, 2014).

Con el amarre sísmica-pozo, empleando los sintéticos y la referencia topográfica del Modelo de Elevación Digital (DEM), para el ajuste de la cuenca del VMM, se procedió con la interpretación sismoestratigráfica, tomando como referencia la línea sísmica regional ANH TR-2006- 04A, sector oriental (Trasandina 2006), que atraviesa toda la cuenca en sentido NW-SE y que se encuentra al sur de la zona de estudio. Esta línea regional se toma junto a los cubos 3D cargados al proyecto de interpretación (programas Cristalina 3D y Cagüi 3D), como la base de extrapolación de la interpretación estratigráfica a las demás líneas sísmicas 2D de la cuenca.

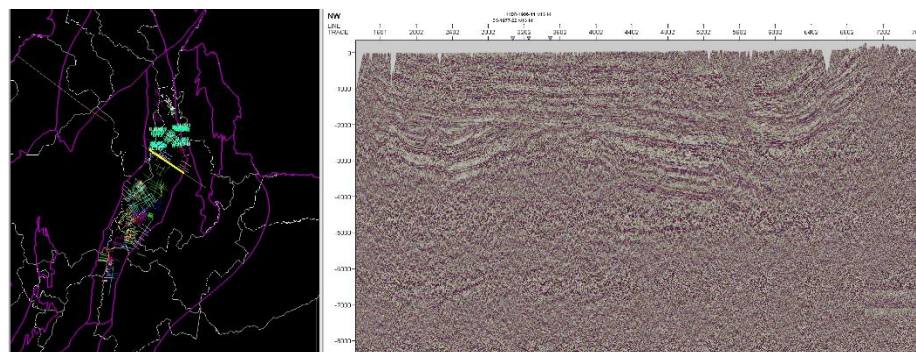


Figura 4-3 Ubicación geográfica de la línea regional Trasandina 2006 No. 04A (línea resaltada en color amarilla), sector Oriental del Valle Medio del Magdalena, VMM. Sobre la sección sísmica se observa el Sinclinal de Nuevo Mundo, La Discordancia del Eoceno y las mega-secuencias del Mesozoico y el Cenozoico (Fuente propia, proyecto Petrel, 2019).

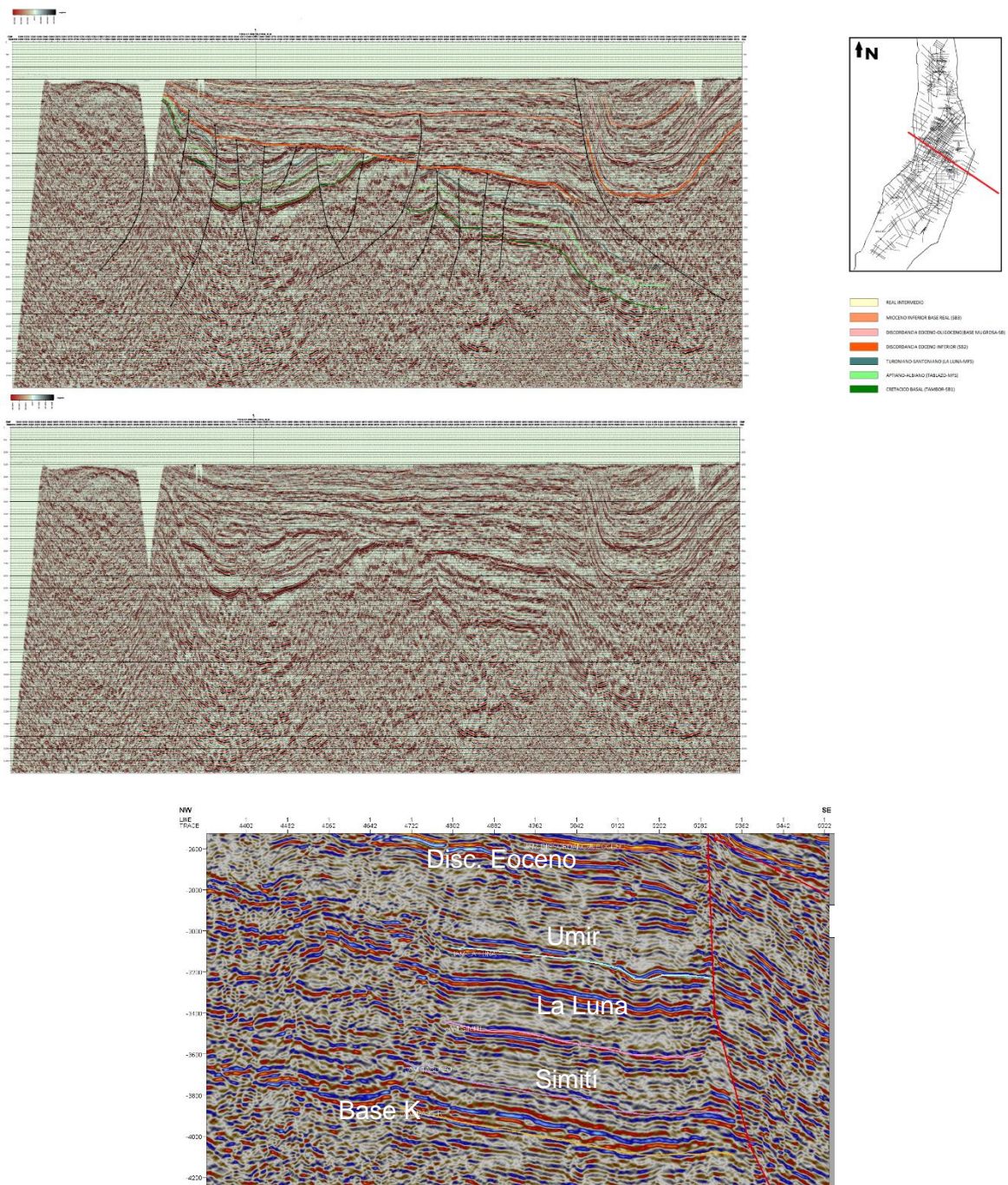


Figura 4-4 Sección de la línea regional ANH TR-2006-04A, donde se observa el Sinclinal de Nuevo Mundo y la interpretación de una parte de la secuencia estratigráfica Mesozoica y Cenozoica.

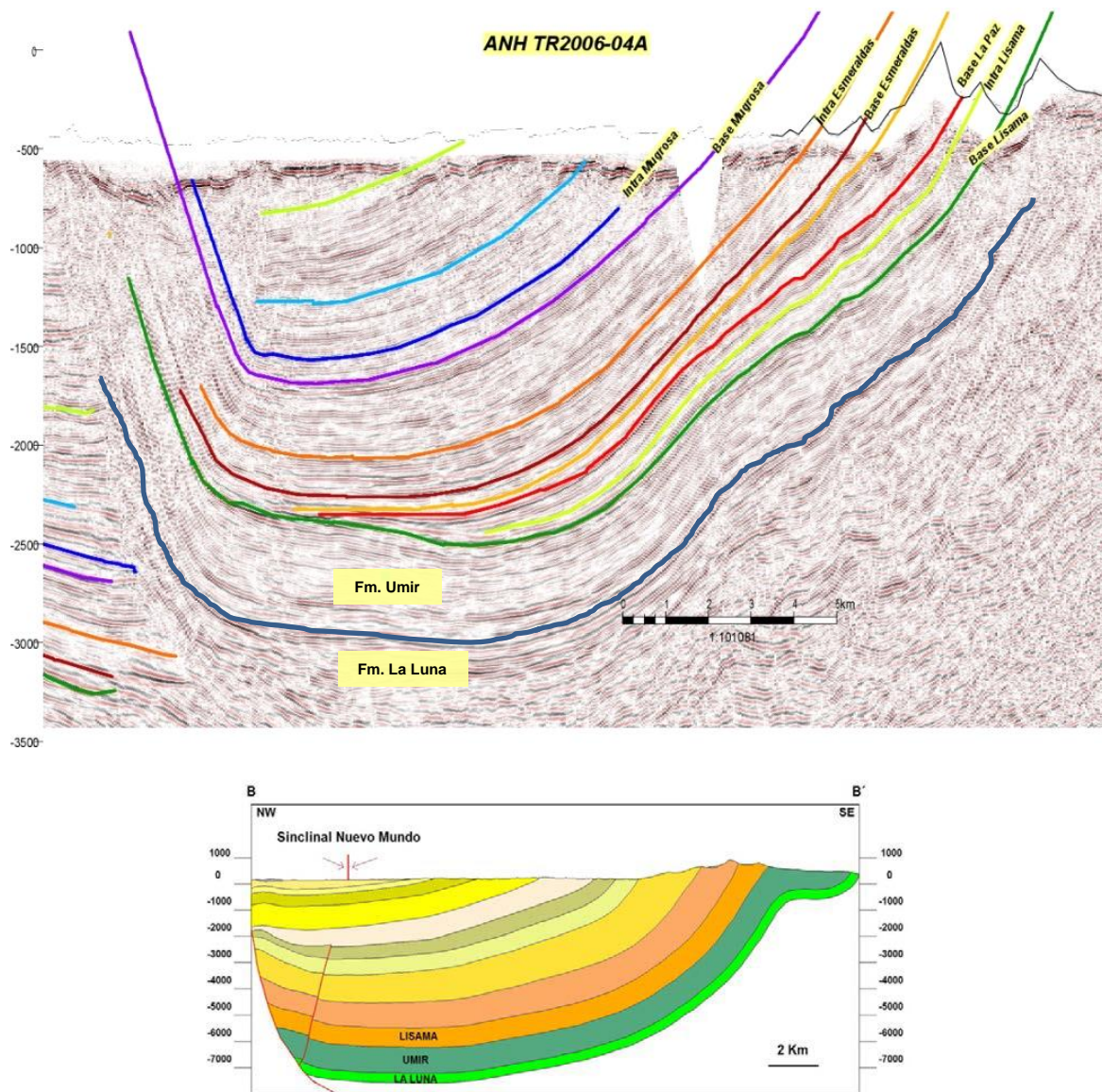


Figura 4-5 Sección ampliada de la línea regional Trasandina 2006, ANH TR-2006-04A, donde se observa el Sinclinal de Nuevo Mundo y una interpretación de una parte de la secuencia estratigráfica Mesozoica y Cenozoica. El espesor de la Formación Umir en este punto, es de aproximadamente 1000 metros. (Perfil B-B', fuente: Recursos de CBM en Colombia, ANH, 2012.)

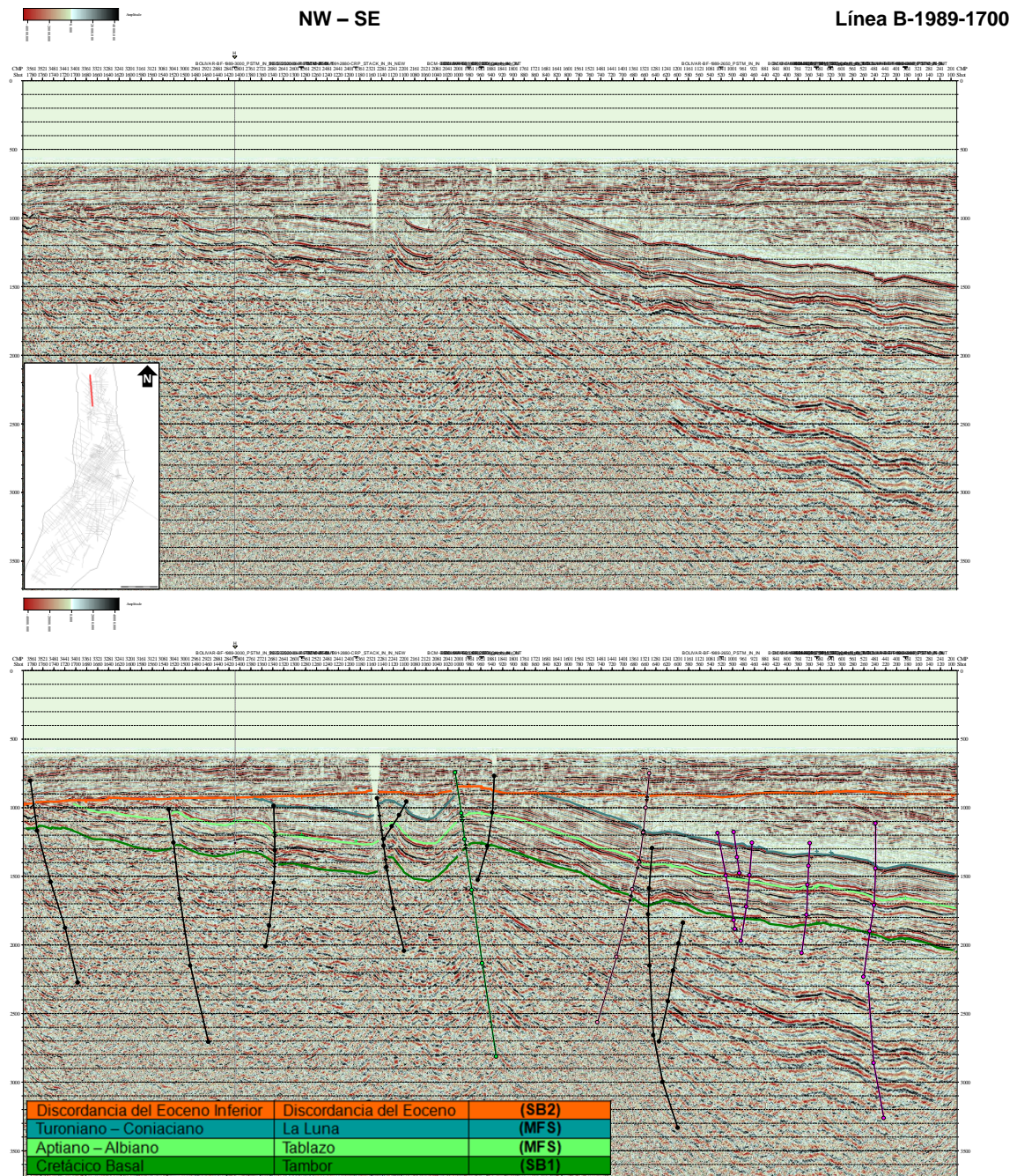


Figura 4-6 Sobre la línea sísmica B-1989-1700, se observan las reflexiones en paquetes tabulares, propios de ambientes marinos, por debajo de la secuencia del Cretáceo Basal (SB1), las estructuras pueden corresponder a secuencias de depósitos Triásico-Jurásico depositadas durante las etapas de apertura de la cuenca. Igualmente se observan las geometrías tabulares (ambientes marinos), de la secuencia calcárea del Cretáceo (Formaciones Umir, La Luna y Tablazo) que truncan en Toplap contra la Discordancia del Eoceno Inferior (SB2) en color anaranjado (SGC, 2014).

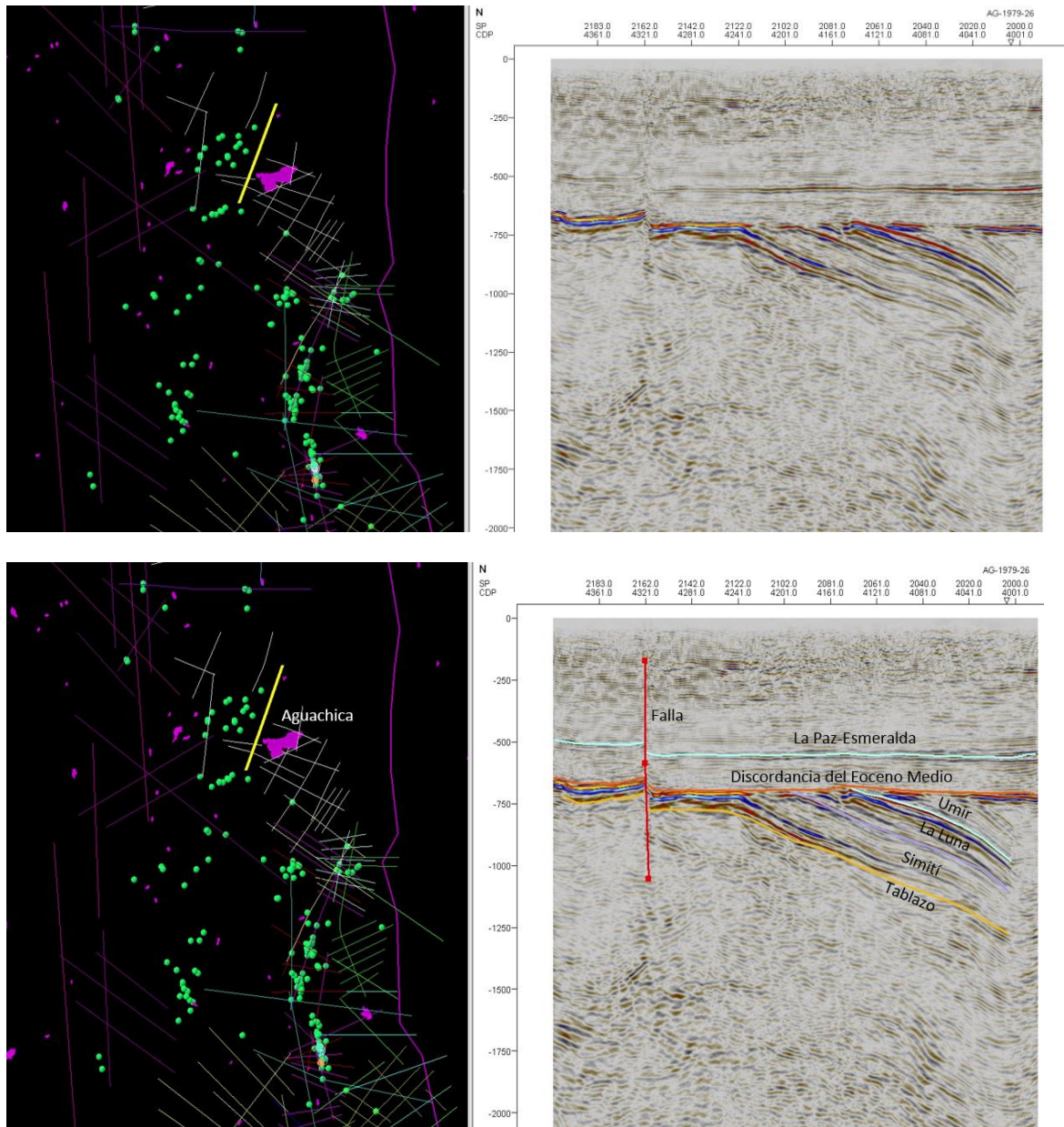


Figura 4-7 Sobre la línea sísmica AG-1979-21 (Programa Aguachica-79), se observan las reflexiones en paquetes tabulares, propios de ambientes marinos de la secuencia calcárea del Cretáceo (Formaciones Umir, La Luna, Simití y Tablazo) que truncan en Toplap contra la Discordancia del Eoceno medio (SB2) en color anaranjado (Interpretación del autor, 2019).

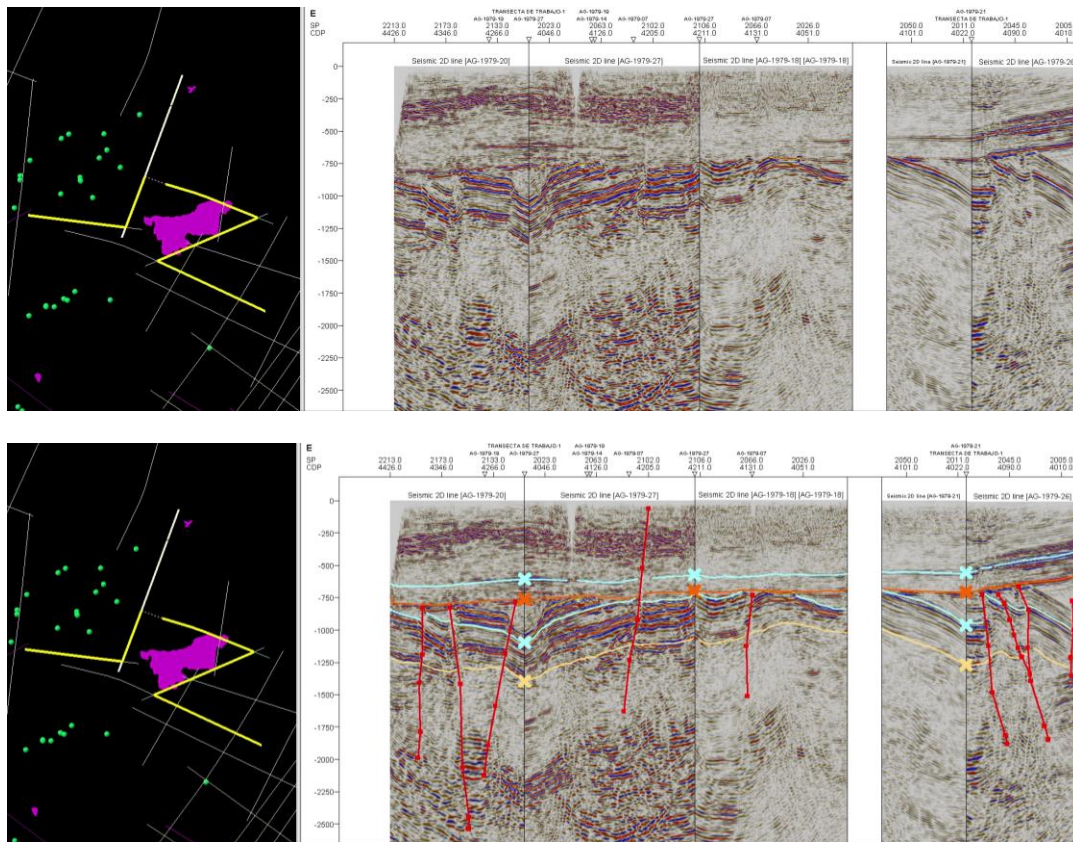


Figura 4-8 Sobre transecta construida con líneas del Programa Aguachica-79, se observan las reflexiones en paquetes tabulares, propios de ambientes marinos de la secuencia Cretácica (Formaciones Umir, La Luna, Simití y Tablazo) que truncan en Toplap contra la Discordancia del Eoceno medio (SB2) en color anaranjado.

4.1.1 Espesores Formación Umir por Pozo

Tabla 3-1 Listado de pozos con espesores de la Formación Umir VMM (Ver anexo).

Pozo	Espesor (metros)
Alamo-1	337
Buturama-2	1252
Cacao-1	39
Caimán-1	1211
Cascabela-1	886
Cope-1	2910
Lebrija-9	240
Morales-1	2166
Morrocroy-1	304
Muzanda-1	200
Norean-1	166
Pital-1	787
Reposo-1	485
Torcoroma-1	341
Totumal-1	2489
Trigos-1	2540

4.2 Estratigrafía de Secuencias

La estratigrafía de secuencias es una herramienta interpretativa, que permite estudiar la respuesta sedimentaria de una cuenca, la cual se origina por las variaciones del nivel base, es decir, la relación espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S) a lo largo del tiempo geológico (Barrell, 1917; Karogodin, 1975) (Figura 4-6). Mediante la identificación y análisis de patrones sedimentarios, que son el reflejo de la interacción entre el espacio de acomodación y el sedimento disponible, se pueden representar los ciclos estratigráficos (Villamizar F. J., 2014). La estratigrafía de secuencias reconoce paquetes de estratos, cada uno de los cuales fue depositado durante un ciclo de cambios relativos del nivel del mar, implicando cambios en el aporte y tipo de sedimentos. Según Van Wagoner et al., (1988) el ciclo estratigráfico se define entre dos superficies que expresen la máxima relación entre el espacio de acomodación y el suministro de sedimentos (A/S). La definición de éste tipo de ciclo estratigráfico obedece a que los límites cronoestratigráficos se localizan casi siempre en o cerca de las máximas relaciones de A/S, éstos máximos pueden coincidir con superficies de máxima inundación. Por otra parte, las mínimas relaciones de A/S coinciden con las superficies de inconformidad o pueden marcar también el punto de mayor progradación o somerización en una cuenca (Villamizar F. J., 2014). La aproximación genética significa que los paquetes de estratos están unidos por superficies cronoestratigráficas, que incluyen a las discordancias creadas durante el ascenso y descensos relativos del nivel del mar. La sismoestratigrafía es una herramienta metodológica, que básicamente realiza una aproximación geológica, a partir de la interpretación estratigráfica de datos sísmicos, en donde las reflexiones son generadas por la impedancia acústica o contraste de velocidades y densidades de las superficies físicas de las rocas, que consiste básicamente en estratos e inconformidades, que al interpretarse, lleva a un registro cronoestratigráfico de patrones deposicionales y estructurales (Mitchum et al., 1977). La unidad básica de análisis en la estratigrafía sísmica, es conocida como la secuencia sísmica, la cual corresponde a una secuencia deposicional identificada sobre las líneas sísmicas. Esta es una sucesión de reflexiones las cuales están genéticamente relacionadas y limitadas por inconformidades o conformidades relativas. En Mitchum et al., (1977) se aclara que las secuencias sísmicas tienen todas las propiedades de las

secuencias deposicionales, sujetas sólo a que esas propiedades, pueden ser reconocidas e interpretadas a partir de las reflexiones sísmicas (Villamizar F. J., 2014).

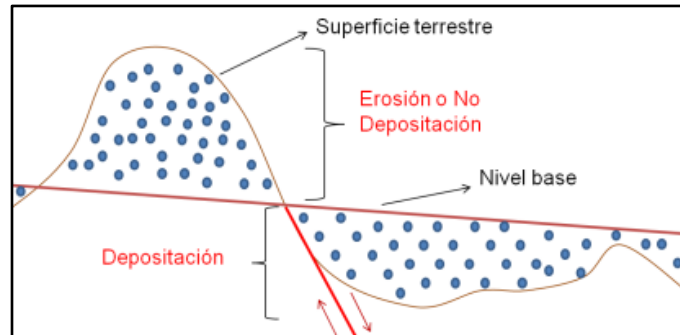


Figura 4-9 Esquema representativo del concepto de estratigrafía de secuencias, la figura superior presenta el concepto de nivel base (Barrell, 1917 y Karogodin, 1975).

Las secuencias sísmicas, son crono-estratigráficamente hablando, muy significativas, y ellas proveen un excelente marco para realizar un análisis estratigráfico. Vail et al., (1977) consideraron la curva eustática como una herramienta de correlación global. Esta presunción asume que la curva global del nivel del mar es el único agente que genera límites de secuencias. Sin embargo, Escalante C. (2005), consideró que los procesos que generan los límites de secuencias son más complejos, otros factores como la tectónica, el flujo de sedimentos, la compensación isostática y la compactación afectan directamente el nivel relativo del mar y el nivel base en las cuencas. Posamentier & Allen (1993) ratifican el hecho, que las secuencias deposicionales en cuencas antepaís, están controladas por una subsidencia producto de una tectónica activa, que generan dos tectonosecuencias una en la zona proximal y la otra en la zona distal, con respecto al margen de la cuenca.

Según Posamentier *et al.*, (1988) en una secuencia sísmica se presentan una sucesión de sistemas deposicionales genéticamente relacionados, cuya interpretación puede indicar cuáles cambios eustáticos dieron origen a su depósito (Villamizar F. J., 2014).

A continuación, se describen las tres secuencias deposicionales y sistemas de tractos, también conocidas como pasajes:

El sistema de tracto de nivel bajo, Lowstand System Tract (LST), el cual incluye depósitos que son acumulados durante la caída de nivel relativo del mar. Este tracto de sistema, es depositado directamente sobre la superficie expuesta, de la mayor caída del nivel del mar.

El sistema de tracto de nivel transgresivo, Transgressive System Tract (TST), comprende depósitos acumulados al iniciar la transgresión marina, se caracteriza por una mayor relación de A/S, debido al incremento del espacio de acomodación.

El sistema de tracto de nivel alto, Highstand System Tract (HST), es el evento resultante durante la etapa final de máxima inundación del mar, que cambia el régimen de deposición y disposición de los sedimentos.

Los límites de secuencias, Sequence Boundary (SB), que es el máximo HST e inicio del FSST o inicio del descenso del mar.

El descenso de sistemas de tractos, Falling Stage System Tract (FSST), que corresponde al lapso de descenso del nivel del mar hasta el inicio del LST.

Las superficies transgresivas, Transgressive Surface (TS), que corresponde al inicio de un TST o aumento del nivel del mar.

La superficie de máxima inundación, Maximum Flooding Surface (MFS), que como su nombre indica, se asocia a la máxima inundación del mar en la cuenca en un tiempo máximo.

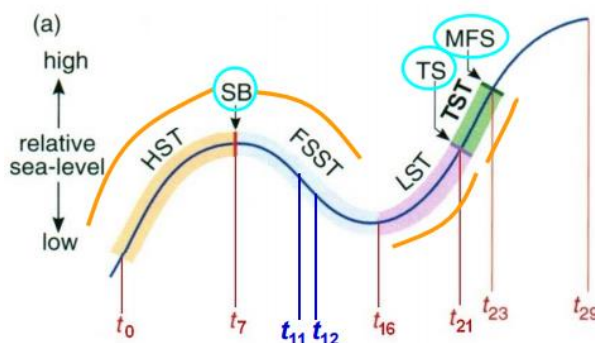


Figura 4-10 Secuencias deposicionales y sistemas de tractos o pasajes, (Tomado de UNAM, 2019).

La disposición de los reflectores sísmicos, determinan las diferentes geometrías, que pueden ser coligadas a determinados rasgos geológicos, para ello es necesario primero, establecer cuáles son las terminaciones de base (Figura 4-8), tales como terminaciones de tipo “downlap”, visibles en la base de la progradación de las clinoformas, terminaciones de tipo “onlap”, que son de bajo ángulo y en contra de una superficie sísmica de mayor pendiente, terminaciones de tipo “toplap”, que son inclinadas en contra de una superficie sísmica suprayacente de bajo ángulo y las truncaciones que son terminaciones inclinadas contra una superficie erosional suprayacente (Nichols G., 2009 y Vail et al., 1977).

Según la metodología propuesta por Sangree & Widmier (1977), y con el fin de crear mapas A-B/C para el reconocimiento de facies sísmicas, se analizaron propiedades de las reflexiones, tomando en cuenta los criterios de amplitud, continuidad, frecuencia (Figura 4-9), patrón interno de las reflexiones (Figura 4-10) y forma dominante externa en la secuencia (Figura 4-11), (Villamizar F. J., 2014).

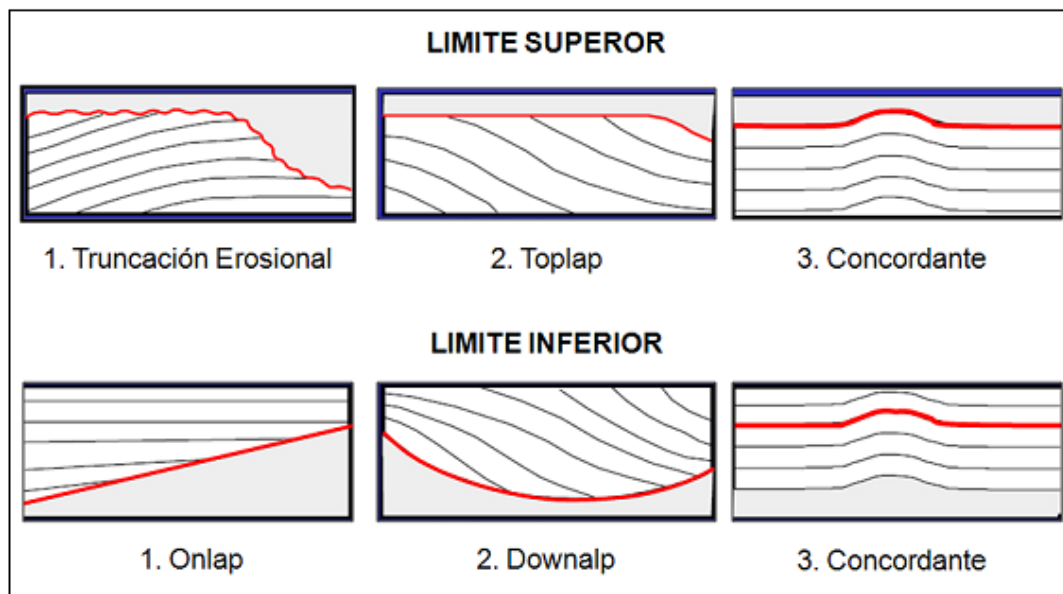


Figura 4-11 Diagrama de las diferentes terminaciones de los reflectores sísmicos y sus respectivos nombres (Tomado de Vail et al., 1977).

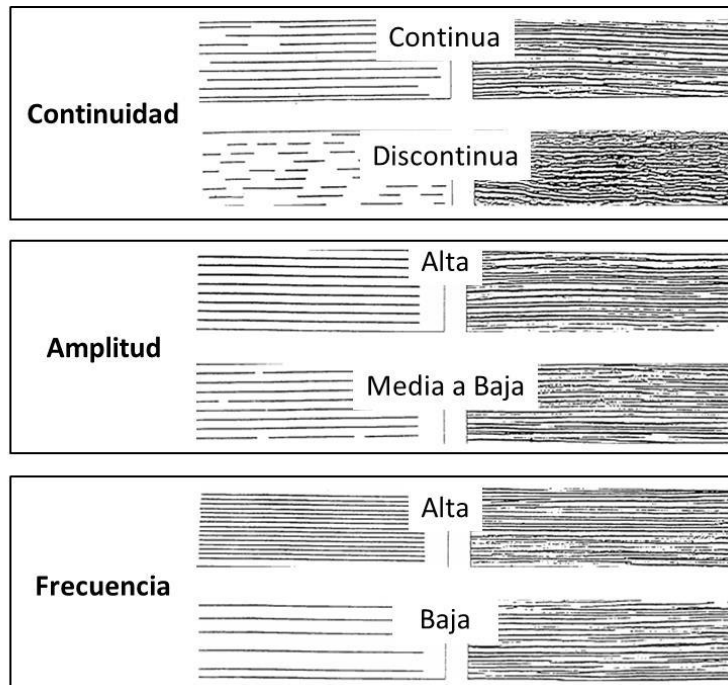


Figura 4-12 Determinación de continuidad, amplitud, y frecuencia de las reflexiones sísmicas (Tomado de Sangree & Widmier, 1977).

CODIGOS DEL SISTEMA A-B/C	
TERMINACIONES LIMITE SUPERIOR (A)	
TRUNCACIÓN EROSIONAL (TOPLAP)	(Te)
CONCORDANTE	(C)
TERMINACIONES LIMITE INFERIOR (B)	
(ONLAP)	(On)
(DOWNLAP)	(Dwn)
CONCORDANTE	(C)
CONFIGURACIÓN INTERNA (C)	
PARALELA	(P)
DIVERGENTE	(D)
CAOTICO	(C)
ONDULADA	(W)
DIVERGENTE (MOUNDED)	(DM)
(MOUNDED)	(M)
PROGRADACIÓN OBLICUA	(Ob)
PROGRADACIÓN SIGMOIDAL	(SIG)
REFLEXIONES LIBRES (SHINGLED)	(Rf)
	(Sh)

CONFIGURACIÓN DE REFLECTORES (DENTRO DE LAS SECUENCIAS)	
CONFIGURACIONES PRINCIPALES	
PARALELA	
SUBPARALELA	
DIVERGENTE	
CLINOFORMAS PROGRADACIONALES	
SIGMOIDE	
OBLICUA	
(COMPLEX) SIGMOIDE-OBLICUA	
(SHINGLED)	
CLINOFORMAS (HUMMOKY)	
CAÓTICA	
REFLEXIONES LIBRES	
POR AGRUPACIÓN	
LISAS	(HUMMOKY)
ONDULADAS	LENTICULAR
REGULARES	INTERRUMPIDAS
IRREGULARES	(CONTORTED)
UNIFORMES	
VARIABLES	

Figura 4-13 Sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C y tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas AB/C (Tomado de Mitchum et al., 1977).




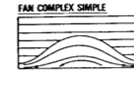

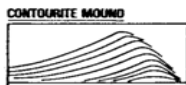


UNIDAD DE FACIES SÍSMICAS	AMBIENTE	FORMA EXTERNA	REFLEXIONES EN LOS LÍMITES	CONFIGURACIÓN INTERNA	AMPLITUD	UNIDAD DE FACIES SÍSMICAS
1. Alta continuidad / alta amplitud	Las olas transportan clastos marinos someros y depósitos parálícos.	Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente	Rel. Alto pero variable	
2. Discontinuo a continuo	(a) Clastos marinos depositados por baja energía con corrientes turbidíticas o por olas. (b) Clastos con transporte fluvial cerca de la costa.	Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente	Muy bajo a bajo	
		Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente	Bajo	
3. Amplitud variable discontinua	Depósitos de clastos no marinos por ríos y procesos marinos marginales.	Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente	Bajo a alto, variable con frecuentes discontinuidades de altas amplitudes	
4. Continua a ondulosa variable	Complejos deltas de plataforma.	Ondula que pueden ser elongada	Tope concordante y suaves "downlap" a la base	Ondulosa, sigmoidal y divergente	Variable. Frecuentemente bajo con discontinuidades locales de altas amplitudes	
5. Cobertura de láminas	Depósitos marinos profundos hemipelágicos.	Cobertura de láminas	Tope concordante. Base concordante o suave "onlap"	Paralelo	Relativamente bajo a moderado	
6. Talud del frente de llenado	Complejos sedimentos de aguas profundas frecuentemente relacionados con abanicos submarinos.	Grandes abanicos	Tope concordante con "Onlaps" buzando hacia arriba, and "downlaps" buzando hacia abajo	Paralelo a subparalelo	Bajo a moderado	
7. Llenado de "Onlap"	Depósitos de Corrientes turbidíticas a velocidad Relativamente baja.	Llenado de cuenca, fosa, canal, y frente de talud	Usualmente tope concordante y base "onlap"	Varía entre divergente, pequeñas Colinas a caótico	Variable 	
8. Pequeñas colinas (abanicos complejos)	Complejos de aguas profundas frecuentemente en desembocaduras de abanicos submarinos. Incluye masas turbidíticas y depósitos hemipelágicos. Relacionado a grandes sistemas de drenaje subaéreos.	Abanico 	"Onlap" de unidades suprayacente, con base "downlap" 		Variable, tiende a ser bajo. Frecuentemente decrece con el incremento de la profundidad. Absorción de alta energía	
9. Colinas	Complejos sedimentos de aguas profundas Depósitos Corrientes marinas profundas probablemente compuestas por granos finos.	Colinas elongadas	Tope truncado /concordante. Base "downlap"	Colinas asimétricas	Variable 	
10. Colinada	Depósitos de Corrientes turbidíticas con relativa alta velocidad.	Llenado de Cuenca, fosa, canal, y frente de talud	Tope concordante o truncado por erosión. Base "onlap"	Colinas irregulares a paralelas	Variable. Disminución continua	
Relleno caótico	Sedimentos por gravedad, transporte de masas y corrientes turbidíticas.	Relleno de cuenca, fosa, canal y frente de talud. Patrón de Colinas.	Terminaciones "onlap" unidas en la base pero algunas individuales	Caótico	Rangos altos	

Figura 4-14 Características faciales para ambientes de deposición clásticos en un escenario de plataforma (Modificado de Sangree & Widmier, 1977).

4.3 Atributos Sísmicos

De acuerdo a Taner (2001), los atributos sísmicos son medidas específicas de geometría, cinemática o características estadísticas derivadas de la traza sísmica, en donde los parámetros manejados, pueden ser la velocidad, amplitud, frecuencia y su tasa de cambio respecto al tiempo y al espacio. Los principales objetivos de estos atributos son proveer información detallada de los parámetros estructurales, estratigráficos y litología del objetivo sísmico estudiado, mejorando la visibilidad de las características de los datos sísmicos (rumbo, buzamiento y continuidad). Estos atributos pueden ser medidos en un instante de tiempo o ventana, sobre una sola traza o un conjunto de ellas (Villamizar F. J., 2014).

Como una extensa generalización, los atributos de tiempo permiten extraer información estructural, mientras los derivados de la amplitud, proveen información estratigráfica y de reservorio. Los atributos derivados de la frecuencia, aún no son bien entendidos, pero existe una amplia tendencia de que ellos proveen alguna información estratigráfica o de reservorio adicional. El atributo más simple y más usado es la amplitud sísmica, usualmente haciendo referencia al máximo valor de amplitud (positivo o negativo a lo largo del horizonte interpretado), (Taner et al., 1994).

Según Chopra and Marfurt (2007), los atributos sísmicos han crecido grandemente, tanto en número como en variedad, y son muchos los autores que han intentado clasificarlos en grupos o familias, con el objeto de mejorar su comprensión y aplicación a las geociencias.

La clasificación de los atributos se divide en pre-apilados o post-apilados, los atributos pre-apilados se calculan antes del apilamiento de las trazas del registro. Uno de los más conocidos es el AVO (amplitud vs. offset), el cual consiste en estudiar y caracterizar las variaciones de amplitudes sísmicas respecto al offset o ángulo de incidencia para una familia CDP. La amplitud de una reflexión de la señal sísmica (ondas sísmicas), ya que normalmente decrece con el incremento de la distancia entre fuentes y sensores.

Los atributos post-apilados, son todos los atributos que se realizan después de los procesos de migración, existiendo una gran variedad que constantemente crece. Los

atributos post-apilados, pueden ser divididos en atributos de tipo instantáneo y atributos de intervalo o también como de tipo horizonte y de ventana (Taner *et al.*, 1994). Los atributos instantáneos, producen un valor para cada muestra de la traza, y los atributos de intervalo, dan un valor para la ventana de trazas seleccionada. Brown (1996 y 2004), clasifica los atributos en tiempo, amplitud, frecuencia y atenuación, los que a su vez se dividen en pre-apilados y post-apilados (Figura 4-12). Los atributos de tiempo proveen información de la estructura, mientras que los atributos de amplitud, proporcionan información estratigráfica y de reservorio.

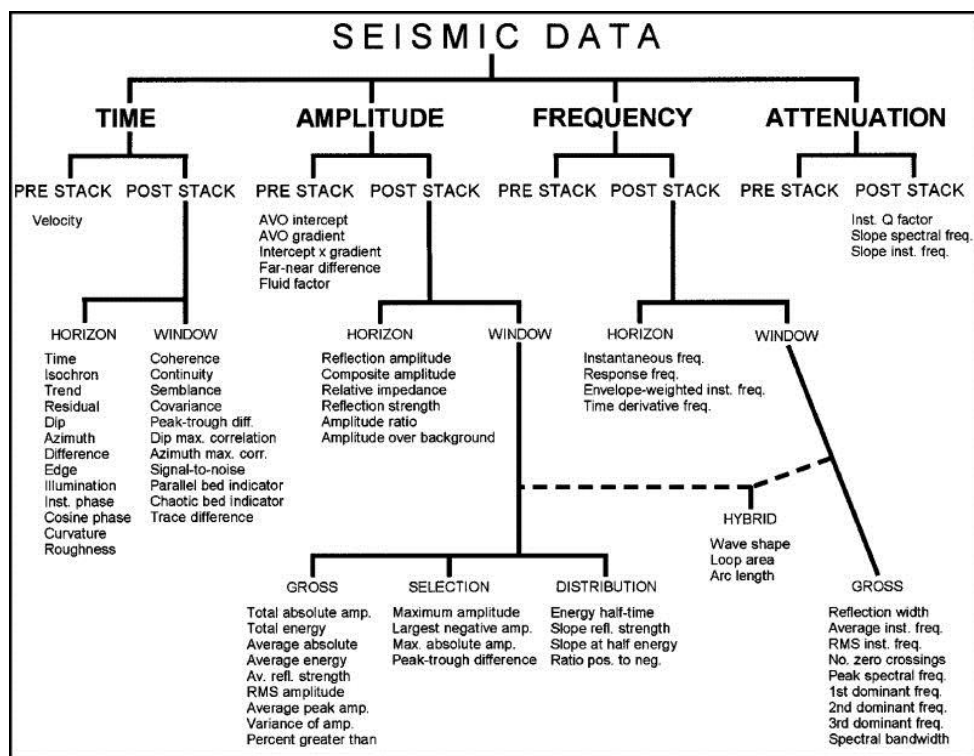


Figura 4-15 Clasificación de los atributos sísmicos (Tomado de Brown y Alistair, 1999). Interpretación de datos sísmicos tridimensionales. Tulsa, publicado conjuntamente por la Asociación Americana de Geólogos del Petróleo y la Sociedad de Geofísicos de Exploración. pp. 234.

Los mapas de atributos generados sobre el área de estudio, tienen como objetivo principal, resaltar las diferentes litologías en las secuencias definidas. Los atributos generalmente son calculados a partir de cada horizonte interpretado y después en intervalos de tiempo cada 20 milisegundos, donde el archivo de salida es un nuevo horizonte que puede ser visualizado como un mapa de contornos.

Los mapas de amplitud RMS (Root Mean Square), son calculados utilizando la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las amplitudes encontradas en la ventana seleccionada, el cual es muy sensible a los valores extremos de las amplitudes, haciéndolo efectivo en la diferenciación de canales con arenas gasíferas (Öz Yilmaz, 2001).

Los mapas de atributos sísmicos de suavizado o Sweetness, se obtienen dividiendo la fuerza de la reflexión, por la raíz cuadrada de la frecuencia instantánea, es muy útil para la detección de canales cuando la impedancia acústica entre arenas y arenas limosas son bajas o cuando las arenas y las lutitas están altamente intercaladas (Hart, 2008).

Los mapas del atributo de impedancia acústica relativa, son calculados a partir de la integración de la traza sísmica original seguido de un filtro (pasa banda bajo), que es utilizado para indicar límites de contraste de impedancia acústica, resaltar disconformidades, discontinuidades y mediante altos contrastes, indicar los límites de secuencias (Francis & Syed, 2001).

Para los mapas de atributos sísmicos de Varianza, se calculan los promedios de todas las muestras en la ventana, lo sustrae de cada muestra y calcula el cuadrado de la diferencia, el resultado es la suma de todos esos valores divididos por el número de muestras, y finalmente, éste atributo lo que hace es correlacionar las trazas cercanas y dependiendo de esa correlación, asigna un determinado color (Schlumberger, 2019).

No menos importante, son los atributos de color, muy variados en las tablas de los diferentes softwares petrotécnicos, los cuales resaltan eventos estratigráficos y/o estructurales, que son útiles durante la fase de interpretación sismoestratigráfica, para la generación de los mapas de contornos de las diferentes unidades geológicas.

4.4 Geoquímica Orgánica

Como se ha mencionado en capítulos previos, la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), es una de las más importantes y prolíficas de Colombia, sus reservas probadas son del orden de 1.900 millones de barriles que han venido extrayéndose de más de 50 campos petroleros (ANH, 2012-2019). Ha sido creencia en la industria, que las rocas de la Formación La Luna, compuesta principalmente de calizas y lutitas calcáreas de edad Cenomaniano-Santoniano, es la roca madre del sistema petrolero de esta cuenca (ANH, 2010; ANH, 2012; Ramón et al., 1997), mientras que La Formación Umir, compuesta de lutitas carbonosas y mantos de carbón, de edad Maastrichtiano (Morales et al, 1958, Tchegliakova, 1993), es considerada como una simple roca fuente (ANH, 2010; ANH, 2012), subestimando el potencial de generación de hidrocarburos de Umir en el VMM (Blandón A., et al., 2018).

Uno de los objetivos del presente estudio, es evaluar la geoquímica orgánica de las formaciones cretácicas del Sector Centro - Norte del VMM y para ello, se toman los resultados y conclusiones del estudio realizado por Blandón et al. (2018), sobre el potencial de generación de hidrocarburos de las Formaciones La Luna y Umir en el Cretácico superior, donde se tomaron para los análisis, los aceites de tres importantes campos petrolíferos: Casabe (Ca), Centro (Ce) y Lisama (Li) y los extractos de bitumen, de las mismas formaciones (Umir y La Luna), con el propósito de determinar el ambiente de depósito, los cambios de facies orgánicas y las relaciones genéticas.

Sobre las muestras obtenidas, se llevaron a cabo los análisis de proximidad, petrografía, palinofacies, extracción de bitumen, cromatografía líquida y biomarcadores (Blandón A. et al., 2018).

Los resultados del estudio concluyeron, que ambas muestras (Formaciones Umir y La Luna), alcanzaron la madurez termal suficiente para producir hidrocarburos a partir de la materia orgánica, debido a que ambas presentan una Reflectancia de la Vitritina ($R_o\%$) que varía entre los 0.48 y los 0.61% (Tabla 4-1). Un marcador contundente, fue el hallado para el porcentaje de Carbono Orgánico Total (TOC %), entre ambas formaciones; donde la Formación Umir, compuesta de lutitas carbonosas y mantos de carbón, presenta un TOC

entre 1.69 y 78.00 %, con un promedio que estuvo siempre por encima del 5%, mientras que la Formación La Luna, tuvo lecturas que variaron entre los 2.38 y 6.74% de TOC, (Tabla 4-1).

Tabla 4-1 Resultados de las características como roca fuente de las Fm. Umir y La Luna (Tomado de Blandón et al., 2018).

Formación y Tipo de Roca	TOC (%)	Ro (%)	Extracto de Bitumen (mg)	HC (%)
Lutitas Fm. Umir	1.69-31.2	0.53-0.55	-	-
Lutitas carbonosas y carbones Fm. Umir	37.9-78.0	0.50-0.61	353-1257	47.31-72.85
Limolitas Fm. La Luna	2.38-6.74	0.48-0.59	39-880	30.56-57.73

TOC=Carbono Orgánico Total, Ro=Reflectancia de la Vitritina, HC=Hidrocarburos, %=Porcentaje

Respecto al tipo de materia orgánica (MO), La Formación La Luna se caracteriza por contener materia orgánica amorfa de origen marino, tales como algas, dinoflagelados, foraminíferos, restos de peces, bivalvos y amonitas; mientras que la Formación Umir, contiene materia orgánica de origen vegetal, en la que abundan los tejidos vitriníticos y cutáneos, granos de polen y resinas, que son generalmente pobres en inertes (minerales de variado tipo y líticos), (Blandón A. et al., 2018), Figuras 4-15 y 4-16.

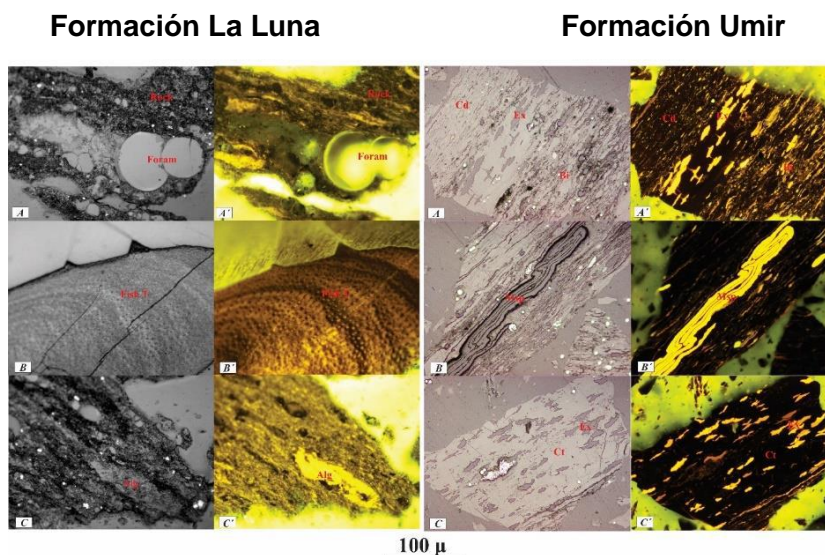


Figura 4-16 Petrografía de las Formaciones La Luna y Umir. Sobre secciones pulidas A, B y C: Con luz normal reflejada; A', B' y C' con luz fluorescente reflejada. Alg: Alginita, T: Tejido, Foram: Foraminífero, Cd: Colodetrinita, Ct: Colotelinita, Ex: Exudatinita, Bi: Bituminita, Msp: Mega Esporinita. (Tomado de Blandón et al., 2018).

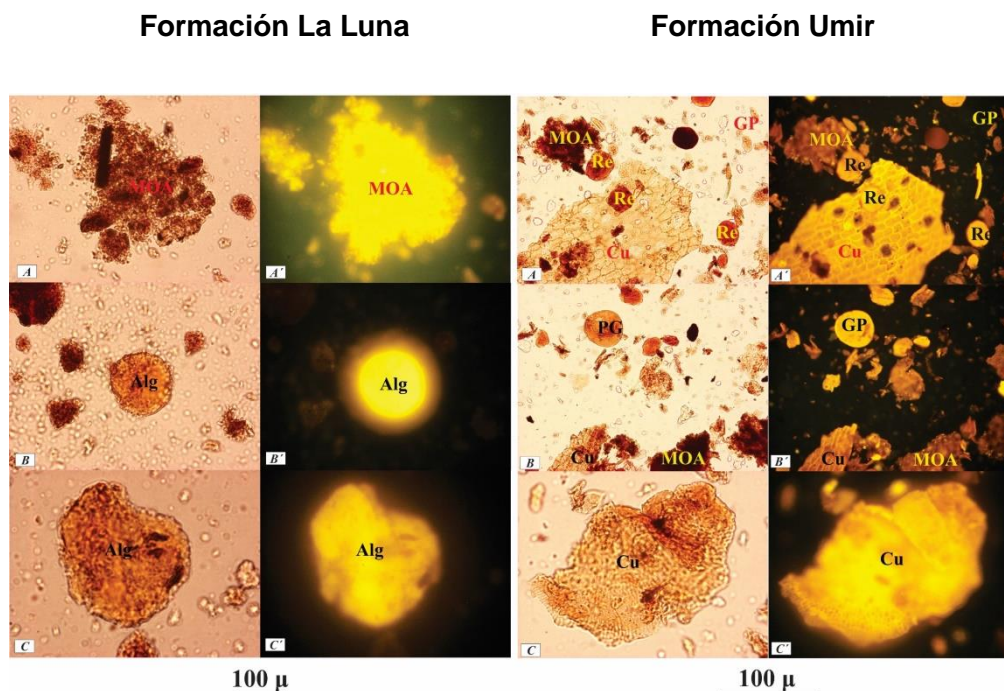


Figura 4-17 Palinofacies de las Formaciones La Luna y Umir. En secciones delgadas, A y B: Con luz normal transmitida; A' y B' con luz fluorescente reflejada. Alg: Alginita, AOM: Materia Orgánica Amorfa, Cu: Cutículas, GP: Granos de Polen, Re: Resinas. (Tomado de Blandón et al., 2018-2019).

Es de notar que los extractos de bitumen (Tabla 4-1), indican que la Formación La Luna tiene un menor contenido de bitumen (39-880 mg), respecto a la Formación Umir, (353-1257 mg), lo que también se aplica a la cantidad contenida de hidrocarburos entre ambas formaciones; es muy claro, que las muestras de la Formación La Luna no solo contiene una menor cantidad de hidrocarburos, sino también una menor calidad (30.56 a 57.73%), respecto a la Formación Umir (47.31 a 72.85%), (Blandón et al., 2018).

Al comparar uno de los extractos obtenidos de las muestras de carbón de la Formación Umir, el porcentaje de hidrocarburos (HC%) es muy similar (72.85%), al de los crudos explotados en la cuenca del VMM, particularmente en el Campo Casabe (72.50%), (Blandón et al., 2018). Demostrando una gran similitud entre los resultados de la distribución de biomarcadores en ambas muestras (Fm. Umir y Campo Casabe), indicando que la influencia de la Fm. Umir es mucho mayor de lo que se pensaba anteriormente, lo anterior, le haría restar importancia a la Formación La Luna, que ha sido catalogada hasta el momento, como la principal roca fuente en el VMM, Figura 4-15. (Blandón et al., 2018).

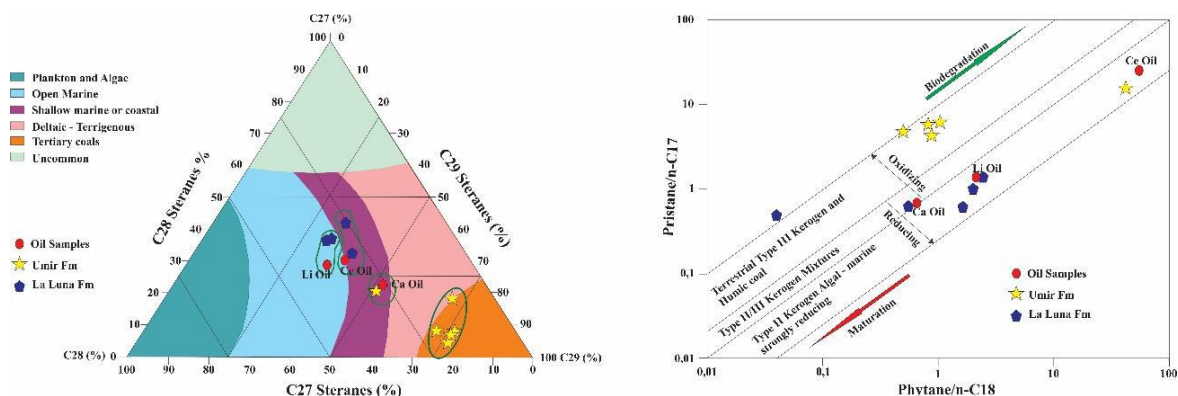


Figura 4-18 Distribución de los esteranos (20R C 20S) C27, C28 y C29 (Huang y Meinschein, 1979) y el gráfico cruzado de pristano / n-C17 vs. Fitano / n-C18 (modificado por Peters et al., 2000, de Shanmugam, 1985). (Tomado de Blandón et al., 2018).

De acuerdo a la evaluación de geoquímica orgánica y estratigrafía de Rangel A. et al., (2002), La Formación Umir, es considerada como una nueva roca fuente de hidrocarburos en el Valle Medio del Magdalena. Los datos de Rock-Eval, mostraron que los mantos de carbón y los esquistos carbonosos propios de esta Formación, revelan un buen potencial para la generación de petróleo, conforme a la función del porcentaje de los valores de TOC y HI, que además fue verificado, con un cotejo de los biomarcadores del crudo obtenido del pozo Santos-31 (Figura 4-16), cuya producción se restringe a las Formaciones Esmeralda y La Paz de edad Eoceno medio-superior, mostrando que su origen corresponde a la Formación Umir, en contraste con las rocas de la Formación La Luna, permitiendo establecer un nuevo sistema petrolífero en Umir-Esmeralda-La Paz (Rangel A. et al., 2002).

Uno de los aspectos más importantes de la Formación Umir desde el punto de vista hidrocarburífero, es que los extractos reflejan aporte mixto, al contener dos tipos principales de materia orgánica, las cuales varían desde algas marinas hasta plantas superiores, cuyas concentraciones dependen de la posición paleoambiental, a lo largo de su evolución geológica (Rangel A. et al., 2002 y Blandón et al., 2018).

Según Blandón y Giraldo (1989), los análisis de cromatografía líquida y de gases sobre los carbonos de la Formación Umir en el área de San Luis, sector suroeste de la sección Quebrada Mata de cacao, mostraron una correlación genética con el crudo del Campo petrolero San Luis, ubicado a 55 kilómetros de distancia (Figura 4-16).

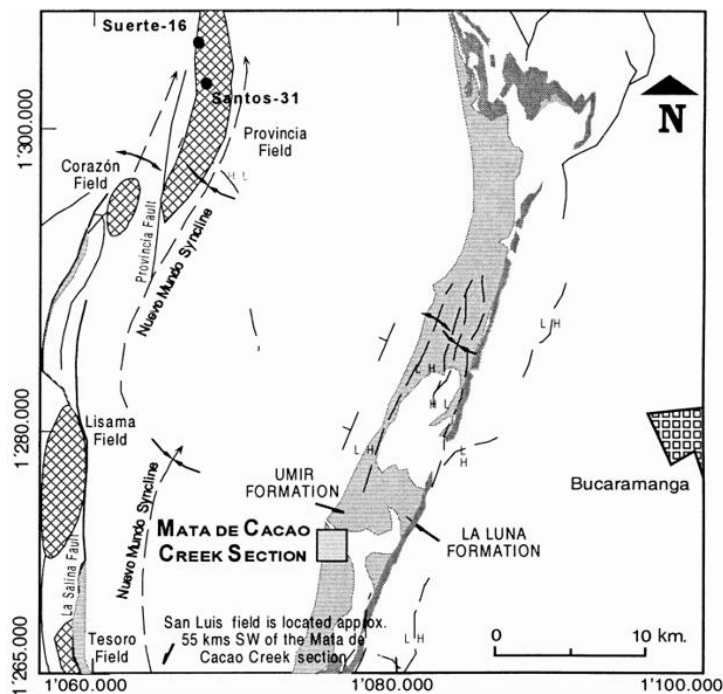


Figura 4-19 Localización de la sección de la Quebrada Mata de Cacao, ubicación de las Formaciones Umir, La Luna y los campos Santos, Suerte y San Luis, Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Tomado de Rangel A. et al., 2002).

Según Rangel A. et al (2002), la geoquímica indica que el petróleo del Campo Santos se generó en su mayor parte o tal vez en su totalidad, de la Formación Umir, Estableciendo el Umir–Esmeralda/La Paz como un nuevo sistema petrolífero; mientras que la fuente de la Formación La Luna, se confirma en correlación con el aceite del Campo Suerte (Figura 4-16). La importancia de dos formaciones rocosas como fuentes eficaces de hidrocarburos, abre nuevas perspectivas de exploración para el VMM, apoyando la existencia de un sistema petrolífero relacionado con la Formación Umir, además del sistema de carga comúnmente asignado a la Formación La Luna (Rangel A. et al., 2002).

Otro aspecto importante de la Formación Umir en el sector norte del VMM, es su potencia o espesor, que en promedio es de unos 1000 metros, disminuyendo (pinchamiento) hacia el noroeste en la Serranía de San Lucas, esta característica unida al rango de Reflectancia de la Vitritina ($R_o\%$), entre 0.53-0.89, hasta un máximo de 1.96 (ANH, 2012), pone a Umir en una posición protagónica por encima de la Formación La Luna en la misma área, no solo como una importante roca fuente, sino también, respecto al potencial de CBM (Coal Bed Methane). Estudios de la Agencia Nacional de Hidrocarburos en 2012 en el bloque

CBM-VMM-01, estimaron un potencial en recursos de Carbón de $3.12 - 6.23 \times 10^9$ ton, un contenido de gas de $290 - 560 \text{ ft}^3/\text{ton}$ y un gas in place (TCF) entre $1.17 - 2.35$.

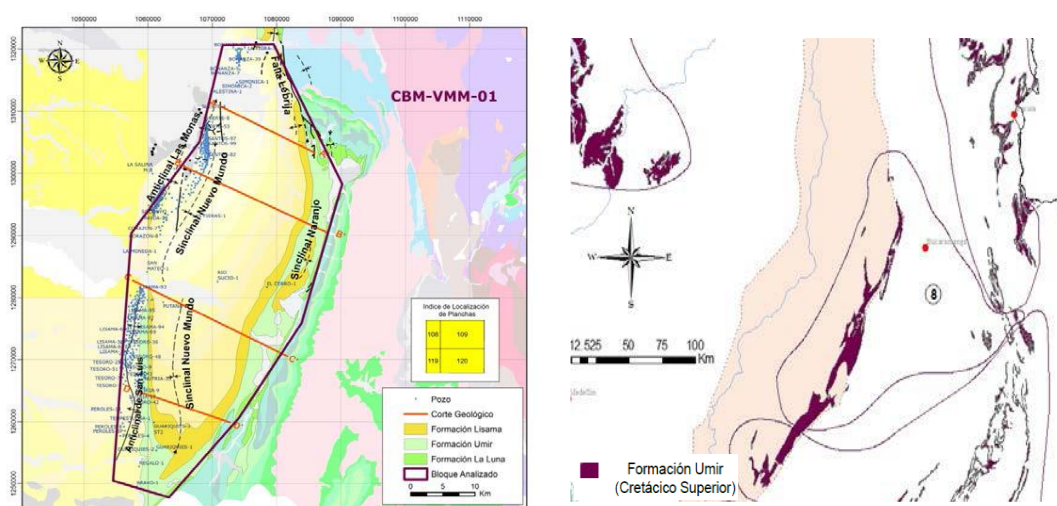


Figura 4-20 Ubicación y distribución de la Formación Umir como potencial de CBM en el bloque CBM-VMM-01 del Valle Medio del Magdalena (Tomado de ANH, 2012).

Aguilera et al., 2010, concluyeron que las mejores rocas fuentes en la Cuenca del Medio Magdalena, con buen a excelente potencial, corresponden a las rocas Cretáceas de las Formaciones La Luna y Umir. Es de aclarar que en este estudio se excluyeron tanto el carbón como las lutitas carbonosas (Blandón A., 2019).

Según Ruíz M. C. (2013), el mapa promedio de Carbono Orgánico Total (TOC%) (Figura 4-20 A) para la Formación La Luna que subyace a la Formación Umir, permite visualizar contenidos de materia orgánica entre 2 y 3 de TOC%, y para la Reflectancia de la Vitrinita ($R_o\%$), que define la madurez termal, presenta un aumento en dirección Occidente a Oriente y de Norte al Sur de la cuenca, esta tendencia se refleja igualmente en la distribución de los fluidos asociados a la generación de hidrocarburos. Teniendo en cuenta, que la madurez termal oscila entre (0.45 - 2.5%), produciendo aceite entre (0.6 -1.2%), condensado entre (1.2 - 1.5%) y gas seco entre (1.5 - 2.5%), se infiere que gran parte del VMM, presenta valores entre 0.6% y 2%, indicando ventana de generación de aceite (Figura 4-20 B).

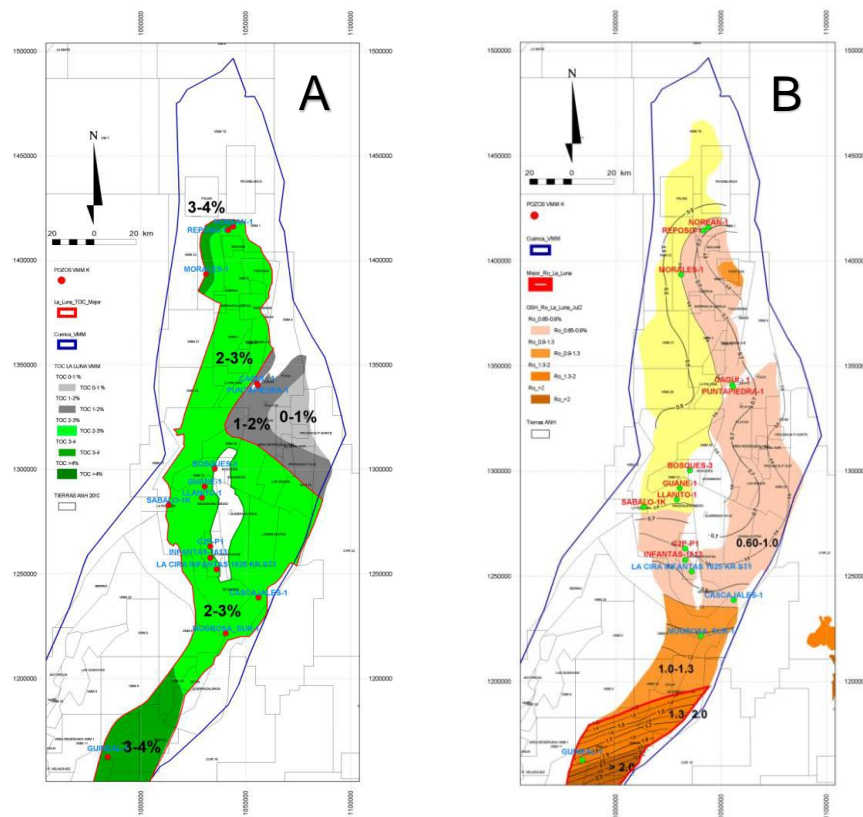


Figura 4-21 Mapa de variación de TOC% (A) y Ro% (B) para la Formación La Luna que subyace a Umir en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. (Fuente Ecopetrol, 2001)

Tomando los parámetros geoquímicos de la Formación La Luna, referentes a la cantidad de materia orgánica (TOC%) y de madurez termal (Ro%), para la parte centro-norte de la cuenca, donde se desarrolló la investigación, se puede determinar que existen condiciones adecuadas para la prospección de aceite en las lutitas.

Ahora bien, al comparar los valores de TOC% y Ro% entre las Formaciones La Luna y Umir (Tabla 4-1), teniendo en cuenta también, las distribuciones de la Figura 4-20, podría afirmarse que el potencial de generación de hidrocarburos es mucho más importante en la Formación Umir que para La Luna.

Finalmente, Blandón A., (artículo en proceso de publicación, 2019), en un estudio realizado para entender y probar a través de geoquímica orgánica de varias muestras de crudos recolectados de diferentes campos hidrocarburíferos y extractos de bitumen extraídos de las columnas estratigráficas de las Formaciones Umir y La Luna, utilizando biomarcadores

para ambas formaciones cretácicas; logra determinar el ambiente depositacional, la madurez, las facies orgánicas y lo más importante, las correlaciones genéticas entre aceite y roca fuente en el VMM. Demostrando que existe una relación genética entre los bitúmenes de la Formación Umir y el crudo de varios campos productores de petróleo en la cuenca.

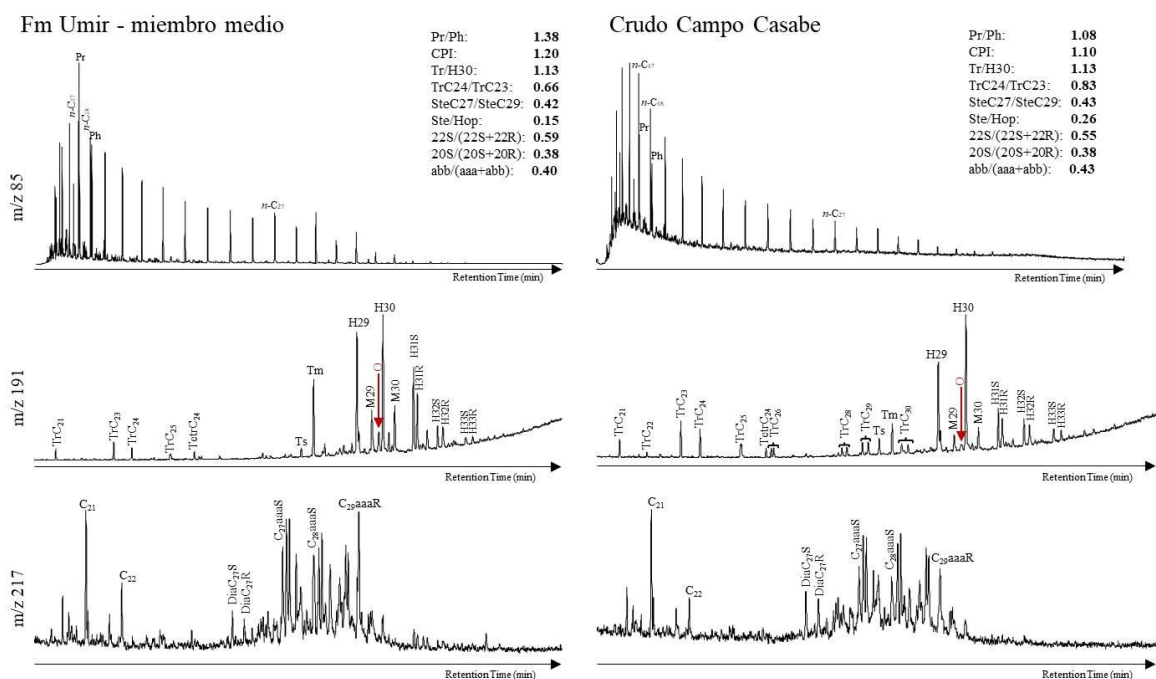


Figura 4-22 Estudio comparativo de las distribuciones y perfiles de biomarcadores n- and i-alkanos entre extractos de La Fm Umir (miembro medio) y el Crudo del campo Casabe (Blandón A. 2019).

Adicionalmente estos estudios probaron que los resultados de cromatografía líquida y biomarcadores de los carbones y lutitas carbonosas de bajo rango (bituminosos) de la Formación Umir, pueden no solo generar hidrocarburos gaseosos, sino también aceite (Blandón A., 2019). Que también se demuestra con la comparación de los datos petrográficos y de palinofacies, que comprueba la existencia de exsudatinita, uno de los principales indicadores de generación temprana en carbones y lutitas carbonosas (Blandón et al., 2005).

5.Resultados

Este Trabajo Final de Maestría (TFM), permitió la construcción de un modelo geológico y geofísico de las unidades cretácicas en el sector norte del Valle Medio del Magdalena, integrando otras zonas conexas del sector central y sur de la cuenca, cuya información fue primordial para el conocimiento de la geometría, disposición y relación entre las unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

Como fundamento de esta investigación, fue necesaria la búsqueda, análisis e integración de la información disponible en bases de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), Banco de Información Petrolera (BIP-EPIS), Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Universidad Nacional de Colombia (UN), Universidad Industrial de Santander (UIS), entre otras universidades y más de doscientas fuentes bibliográficas existentes para la cuenca.

5.1 Análisis e Integración de Información Geológica y Geofísica

Del universo de información geológica y geofísica existente del VMM, se filtró aquella disponible y de utilidad para el presente trabajo, definiendo el mejor cubrimiento de datos e información a lo largo y ancho de la cuenca (Figura 5-1).

La información geológica y geofísica recopilada requirió un trabajo previo de revisión y edición de los datos, con el propósito de asegurar su calidad para su posterior carga en la plataforma petrotécnica y dar inicio a las fases de ajuste sísmico/pozo y de interpretación estructural y sismoestratigráfica.

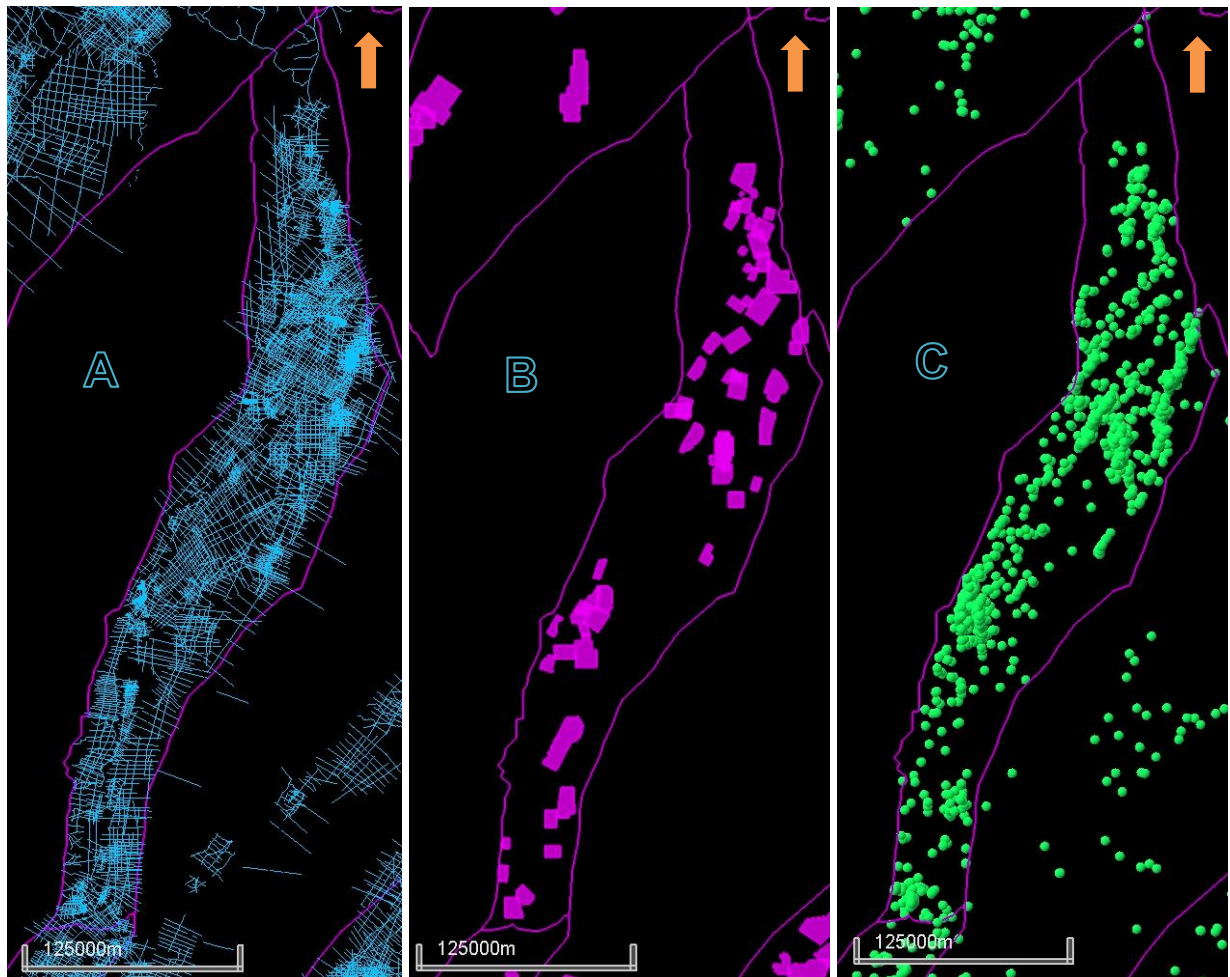


Figura 5-1 Información geológica y geofísica existente en el Valle Medio del Magdalena, de acuerdo al shape actualizado a 2019 del Banco de Información Petrolera (BIP).
A: Líneas sísmicas 2D, B: Programas Sísmicos 3D y C: Pozos

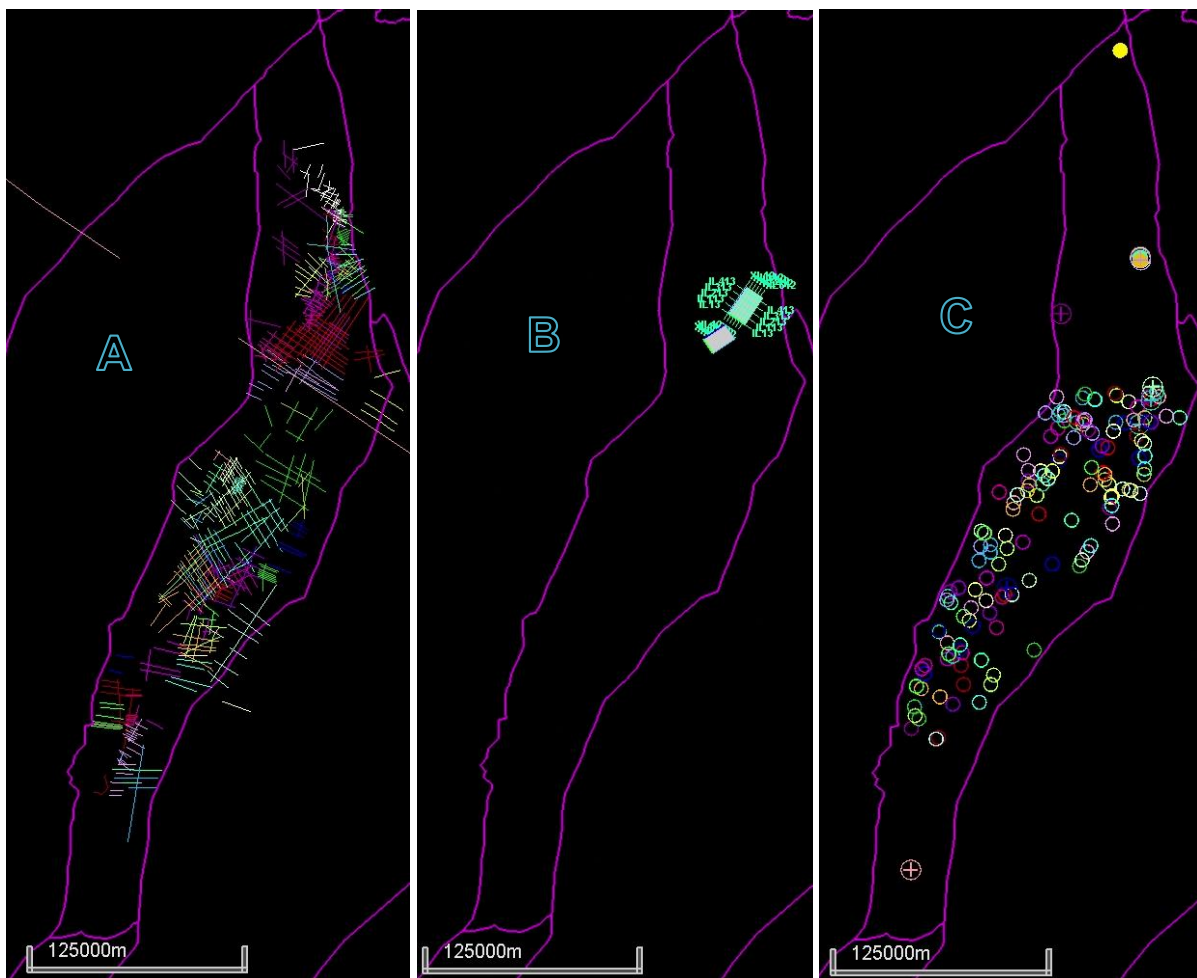


Figura 5-2 Información geológica y geofísica cargada en la plataforma petrotécnica Petrel para el proyecto de investigación de maestría del Valle Medio del Magdalena, VMM. A: Líneas sísmicas 2D, B: Programas Sísmicos 3D y C: Pozos

Esta fase inicial de carga sísmica 2D/3D y de pozo, permitió obtener los siguientes resultados (Tabla 5-1).

Tabla 5-1 Carga de información geológica y sísmica utilizada en el proyecto de maestría.

Tipo de Información	Cantidad Cargada en Petrel
Líneas Sísmicas 2D	473
Cubos Sísmicos 3D	2
Pozos con set de registros básicos	180

5.2 Interpretación Sismoestratigráfica, Aporte y Refinamiento del Conocimiento de la cuenca VMM

La fase de interpretación, generó nueva información con base en los datos geológicos y geofísicos disponibles, aportando nuevo conocimiento sobre la región norte del VMM, permitiendo además, un potencial acople con investigaciones previas disponibles de otros sectores de la misma cuenca.

5.3 Geoquímica y Materia Orgánica de la Formación Umir

Utilizando la información de topes o marcadores de los pozos disponibles, y de la información de materia orgánica (MO) recopilada de algunos campos productores del VMM, así como de muestras de pozo y datos de afloramientos (bitumen), se muestra la potencialidad de la Formación Umir de generar hidrocarburos convencionales y no convencionales.

5.4 Análisis Petrofísico y Estratigráfico de Pozos

A partir de los registros eléctricos convencionales es posible identificar la litología de forma global (sin establecer una composición mineralógica detallada sino predominante), y a través de una serie de suposiciones, estimar propiedades como la porosidad (\emptyset), Saturación de Agua (S_w) y arcillosidad.

Para la identificación de la litología se pueden comparar las respuestas de los registros de porosidad densidad y neutrón, teniendo en cuenta las matrices para las cuales éstos fueron calculados, con base en las mediciones de densidad de la roca e índice de neutrones. La siguiente figura ilustra este concepto.

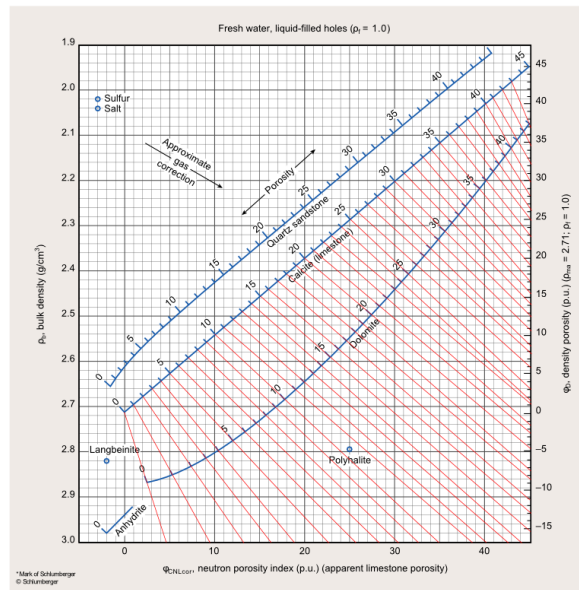


Figura 5-3 Gráfica de porosidad y determinación de litología a partir de registros de Lito-Densidad y registros de Neutrón compensado (CNL), cruzado Densidad-Neutrón (Cortesía Schlumberger).

Sin embargo, una determinación más precisa de la litología se puede obtener a partir del registro PE (Efecto Fotoeléctrico), ya que da una indicación más directamente relacionada con la densidad electrónica de la Formación. La siguiente tabla presenta una compilación de los valores de PE característicos de cada mineral.

Mineral	Formula	Molecular Weight	P_e	Z (equiv.)	ρ_b	ρ_s	ρ_L	U
Anhydrite	CaSO_4	136.15	5.055	15.69	2.960	2.957	2.977	14.93
Barite	BaSO_4	233.37	266.82	47.2	4.500	4.01		1070
Biotite			6.30				3.34	21.03
Calcite	CaCO_3	100.09	5.084	15.71	2.710	2.708	2.710	13.77
Dolomite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184.42	3.142	3.74	2.870	2.864	2.877	9.00
K Feldspar			2.86				2.62	7.51
Glauconite			5.32				3.95	21.00
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172.18	3.420	14.07	2.320	2.372	2.350	9.37
Halite	NaCl	58.45	4.169	15.30	2.165	2.074	2.031	9.68
Haematite	Fe_2O_3	159.70	21.48	23.45	5.240	4.987		107
Limonite			13.00				3.59	46.67
Magnetite	MgCO_3	231.55	22.24	23.65	5.180	4.922		113
Muscovite			2.40				3.29	7.90
Pyrite	FeS_2	119.98	16.97	21.96	5.000	4.834		82.1
Quartz	SiO_2	60.09	1.806	11.78	2.654	2.650	2.648	4.79
Siderite	FeCO_3	115.86	1.69	21.09	3.940		3.89	55.9
Sylvite	KCl	74.6	8.510	18.13	1.984	1.916	1.862	15.83
Zircon	ZrSiO_4	183.31	69.10	32.45	4.560	4.279		311
Shale	-		3.42	14.07	2.650	2.645	2.642	
Shaly Sand	-		2.70				2.41	6.52
Anthracite	-		0.161	6.02	1.700	1.749	1.683	
Bituminous Coal	-		0.180	6.21	1.400	1.468	1.383	
Pure Water	H_2O	18.02	0.358	7.52	1.000	1.110	1.000	0.398
Salt Water	120,000ppm NaCl		0.807	9.42	1.086	1.185	1.080	0.850
Oil	$(\text{CH}_2)_n$		0.119	5.53	0.850	0.948	0.826	0.136x
Methane	CH_4	16.04	0.095	5.21	0.250		0.15	0.119x

Figura 5-4 Valores del índice PE para una lista de minerales (Notas del curso de petrofísica, Dr. Paul Glover – Registro de lito-densidad, Universidad de Leeds.

Una vez distinguidas las litologías predominantes, se cruza la información con el registro Gamma Ray, el cual indica el nivel de arcillosidad, para detectar si es una zona limpia, susceptible de alojar fluidos móviles. También se extrae información de los registros de porosidad, para así determinar si existe acumulación de fluidos en esa Formación. Si cumple con las anteriores características, se considerará al intervalo como un potencial yacimiento.

Posteriormente, a las zonas potenciales de yacimiento se les hace un cálculo de porosidad equivalente con base en el crossplot densidad-neutrón y con información del registro sónico (si se cuenta con él) para confirmar los rangos de porosidad. Suponiendo que es una zona saturada de agua, se lee del registro de resistividad profunda y se asimila a la resistividad no alterada de la Formación. Con esto es posible generar gráficos de crossplot como el gráfico de Pickett, para determinar la resistividad del agua de Formación, y así estimar valores de saturación de fluidos con base en la ecuación de Archie:

$$S_w = \left(\frac{a \times R_w}{R_t \times \phi^m} \right)^{\frac{1}{n}}$$

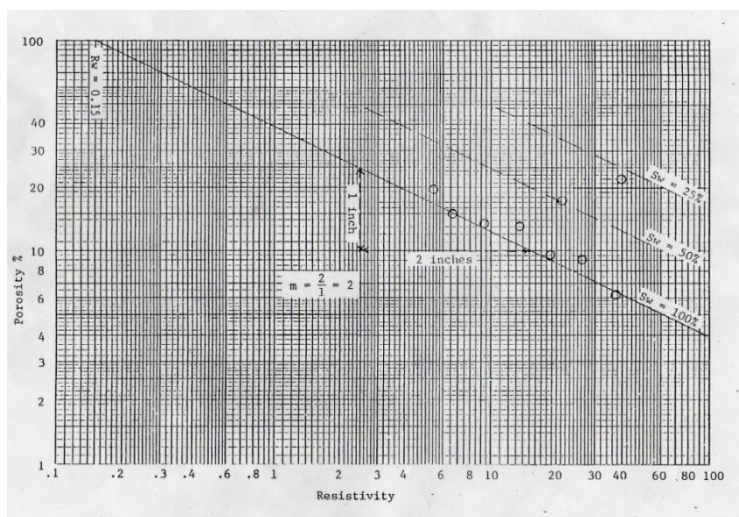


Figura 5-5 Gráfico de Pickett, Niz V. E., Material de Clase “Well Logging and Formation Evaluation”, Universidad de Calgary, 2008.

Inicialmente se pueden suponer valores de $a=1$, $m=n=2$, que son los valores por defecto que se utilizan en exploración, cuando no se cuenta con más información, pero se pueden

también suponer otros valores dependiendo de la naturaleza de la Formación (consolidada o no consolidada, fracturada o no fracturada, arcillosa o no arcillosa).

Para la realización de este novedoso procedimiento y análisis petrofísico (Niz V. E., 2018), se utilizó la información disponible de registros eléctricos, imágenes de registros gráficos compuestos, informes de geología e ingeniería, correspondientes a los archivos en formatos *.LAS, *.DLIS y *.PDF.

También se incluyeron como intervalos prospectivos aquellos que, basados únicamente en la información de registros eléctricos, se pudieran identificar como tales, incluyendo, pero no limitados a los dos siguientes aspectos:

1. Zonas de baja arcillosidad, con porosidad en al menos uno de los registros y litología correspondiente a roca almacén, debido a su potencial como yacimientos convencionales.
2. Zonas identificadas como mantos de carbón o predominantemente carbones, debido a su potencial de gas asociado al carbón o CBM.

Para la identificación de yacimientos no convencionales de tipo oil shale o gas shale se requirió información complementaria de otras fuentes, tales como contenidos de materia orgánica y Reflectancia de la Vitrinita, entre otros.

A continuación, se presenta este nuevo método petrofísico para la identificación de los posibles intervalos prospectivos, tomando como ejemplo el pozo LA PISTA-1X. Este pozo fue seleccionado para el análisis, por tratarse del más septentrional del VMM, donde no existe mucha información exploratoria.

5.4.1 Pozo LA PISTA-1X

La interpretación litológica derivada de los registros tomados de este pozo, concluyen que atraviesa una sola secuencia clástica sedimentaria, compuesta principalmente por areniscas a areniscas conglomeráticas y conglomerados con intercalaciones de arcilla (Grupo Real). El Grupo Real, se caracteriza por ser una secuencia con dos unidades definidas: Limolitas Metamorfoseadas con aporte de rocas no sedimentarias, provenientes del complejo ígneo e intercalaciones de conglomerados, (Serviminas, 2016); las curvas de

resistividades, densidad y neutrón, a pesar de estar bien calibradas presentan afectación por el complejo de rocas ígneas, la lectura de rayos gamma confirma alta radiactividad y el factor fotoeléctrico (PE), indica valores asociados a posibles carbonatos, que se ajustan más a rellenos de fracturas.

La permeabilidad absoluta calculada a partir de la ecuación de TIMUR, para la zona de Limolitas metamorfoseadas, muestra un rango promedio de 5.1 millidarcies llegando a lecturas de hasta 11.3 millidarcies, con una dispersión moderada de los datos. El cálculo de Porosidad total a partir del método Densidad –Neutrón, arrojó un resultado promedio de 30%.

Para la unidad de Conglomerados del Gr. Real, la permeabilidad absoluta calculada a partir de la ecuación de TIMUR, muestra un rango promedio de 10 millidarcies llegando a lecturas de hasta 15.1 millidarcies con una dispersión moderada de datos. El cálculo de porosidad total a partir del método combinado para la Unidad Conglomerados- Densidad –Neutrón, arrojó un resultado promedio de 36%.

Más profundo en la perforación, a partir de los 836 ft. Aproximadamente, se encuentra una secuencia de rocas plutónicas frescas, no meteorizadas, de composición media a ácida (Formación Noreán), la cual va desde una monzonita feldespática hasta una cuarzo-dacita y cuya descripción es una roca masiva, textura fanerítica, hipidiomórfica, dura, de color naranja rojizo moderado, menor amarillo pálido, negro verdoso, ocasional blanco lechoso, hialino, compuesta principalmente por 40% feldespatos rosados, 50% marrón amarillos, 5% cuarzo blanco lechoso, con micas (biotita), piroxenos de color verde oliva a negro, se observan micro-venas rellenas de carbonato de calcio, la roca presenta un nivel bajo de meteorización. Hacia la base de esta secuencia se observa diques de clorita, en los cuales se observa una ligera meteorización y la roca se hace más granito-feldespático alcalino masivo, muy duro, moderadamente fracturado, textura fanerítica, en algunas partes porfídica, heterogranular, color marrón rojizo moderado, menor translúcido, blanco sub-translúcido, amarillo verdoso pálido, ocasional verde oscuro, negro, se observan monzonita: con fenocristales de feldespato potásico, compuesta por 60% feldespato potásico, 30% cuarzo, 10% Plagioclasas, con trazas de biotita y piroxenos; micro-fracturas rellenas de carbonato de calcio (Informe final de pozo, ANH – Serviminas, 2016).

Los registros muestran diferencias puntuales en la Formación, en las zonas de alta radiactividad quizás asociado a minerales pesados por el metamorfismo incipiente, las curvas de densidad y neutrón tienden a tomar direcciones opuestas, a su vez el gamma aumenta y la resistividad aumenta considerablemente hacia la parte basal de los registros debido a que se encuentra una litología asociada a rocas ígneas.

Si bien las respuestas de los registros pueden estar alterados por presencia de diferente litología, la respuesta muestra altas lecturas en resistividad, quizás sea por lo compacto de la litología, alta radiactividad asociada a minerales traza dentro de dichas rocas, baja porosidad y un factor fotoeléctrico con un valor alto.

La permeabilidad absoluta calculada a partir de la ecuación de TIMUR, muestra un rango en millidarcies promedio de 0.45, llegando a lecturas confiables de 1.1, con una dispersión de moderada a alta de los datos. El cálculo de Porosidad total a partir del método combinado para la Unidad rocas ígneas, Complejo Ígneo NOREAN- pozo LA PISTA-1X. (Densidad –Neutrón) arrojó un resultado promedio de 6%, al comparar las lecturas se ve la afectación de los registros en zonas con metamorfismo incipiente, en algunos casos los registros de porosidad no están corregidos por compactación.

A continuación, se presenta una tabla generalizada con los resultados obtenidos:

Tabla 6-1 Unidades litoestratigráficas estudiadas al norte del VMM.

Formación	Unidad/Miembro	Permeabilidad (Md.)	Porosidad (%)
Grupo Real	Limolitas metamorfoseadas	5.1-11.3	30
	Conglomerados	10 – 15.1	36
Formación Noreán	Unidades Ígneas	0.45 - 11	6

La siguiente tabla refleja los intervalos que fueron seleccionados como prospectivos:

Tabla 7-1 Intervalos identificados como prospectivos al norte del VMM.

Tope (ft)	Base (ft)	GR (API) Mín - Máx		POR(NEU) SS Mín - Máx		POR (DEN) SS Mín - Máx		PE (Barns/Elec) Mín - Máx		Resistivity (Ohm-m) Mín - Máx		Observaciones/ Interpretación
106	116	32	74	52	42	36	29	1.8	2.6	15	34	Arenisca limosa
182	195	31	55	42	36	41	30	1.8	2.2	12	55	Arenisca limosa
227	236	38	60	42	36	40	29	1.8	2.3	15	19	Arenisca arcillosa
568	582	32	52	68	24	43	17	2	4	24	40	Arenisca calcárea
620	656	45	69	54	36	42	27	2.4	3.8	22	29	Arenisca arcillosa

5.4.1.1 Determinación de propiedades petrofísicas de los intervalos prospectivos

Considerando que no se dispone de valores de la resistividad del agua de la Formación, se utilizó el gráfico de Pickett para extrapolar a un valor de $a \cdot R_w$, suponiendo un valor de $a=1.0$, se infirió la resistividad del agua. La línea usada para la extrapolación corresponde a una pendiente de 0.5 ($m=2.0$) y se traza uniendo los puntos ubicados en zonas con arcillosidad relativamente baja. Se compararon los valores de resistividad del agua de Formación entre intervalos para verificar que tuvieran una coherencia física (sólidos totales disueltos deberían aumentar con la profundidad, y por consiguiente, la resistividad debería disminuir con la profundidad a temperatura constante).

La porosidad que se utiliza en el gráfico de Pickett corresponde al promedio aritmético entre las lecturas de porosidad neutrón y porosidad densidad. Esto a menos que haya razones excepcionales para hacer una corrección más sofisticada, por ejemplo, una excesiva separación entre las dos curvas (zona de gas, mediana a alta arcillosidad, presencia de minerales pesados o intercalación de rocas de baja densidad, etcétera).

La resistividad del agua obtenida se utiliza para calcular la saturación de agua en una parte limpia del intervalo que exhiba una lectura de resistividad profunda relativamente alta. Dependiendo del valor de saturación calculado y de la incertidumbre por los valores no conocidos (a , m , n) se interpretará como una zona de hidrocarburos o una zona de agua.

Si es una zona de hidrocarburos se observará si existe un crossover densidad-neutrón o una reducción del Factor Fotoeléctrico (PE) teórico para la litología interpretada, en cuyo caso se determinará que se trata de gas, o en caso contrario, aceite.

A continuación, la determinación de propiedades petrofísicas básicas (porosidad y saturación de agua) para el pozo de estudio.

Se realizaron los gráficos de Pickett para los intervalos prospectivos identificados en la sección anterior. Se ejemplifican los cálculos detallados para el primer intervalo y luego se presenta una tabla resumen para todos los prospectivos. El primer intervalo potencial corresponde a un rango de 106 a 116 ft de profundidad. El gráfico de Pickett es como se muestra en la siguiente figura.

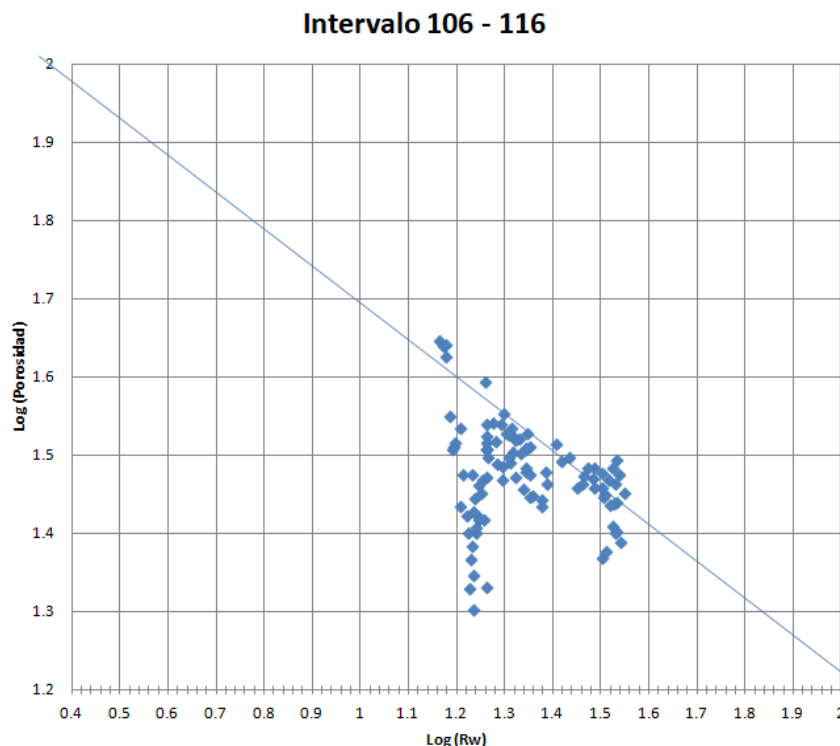


Figura 5-6 Gráfico de Pickett para el intervalo 106-116 ft. (Elaboración propia).

La nube de puntos muestra un rango estrecho de valores de porosidad (logaritmo entre 1.3 y 1.7) y así mismo de valores de resistividad (logaritmo entre 1.1 a 1.6). La línea de pendiente $\frac{1}{2}$ fue trazada a través de los puntos con resistividad media-alta que leen los valores medios de resistividad. La extrapolación a un logaritmo de porosidad 2.0 (100

unidades de porosidad) arroja un valor de $a \cdot R_w = -0.43$, lo cual corresponde a una resistividad del agua de 2.69 ohm-m. Realizando el cálculo con la ecuación de Archie usando $R_w = 2.69$, $m = n = 2.0$, y $a = 1.0$, para el valor más alto tomado de una zona limpia del registro de resistividad profunda (de acuerdo con la tabla de identificación de litología es de 34 ohm-m) y un valor de porosidad promedio densidad-neutrón de 32%, se obtiene que la mínima saturación de agua en el intervalo es de 86%. La interpretación entonces es que se trata de un intervalo saturado con agua, y que la saturación de agua reducida responde a pequeños cambios locales de porosidad o a incertidumbre en los parámetros de la ecuación de Archie.

De la misma forma se realiza el procedimiento del párrafo anterior y se consignan los resultados por cada intervalo en la siguiente tabla:

Tabla 8-1 Intervalos identificados como prospectivos al norte del VMM.

Intervalo (tope a base, ft)	Porosidad Densidad- Neutrón Promedio	Rango de resistividad profunda (ohm-m)	a, m, n	Log(R_w) de Pickett	Resistividad del agua de Formación (R_w , ohm-m)	Valor más alto de R_t (ohm-m)	Saturación calculada (S_w)	Interpretación
106-116	0.325	15-34	1, 2, 2	0.43	2.69	34	0.866	Zona de agua
182-195	0.392	12-55	1, 2, 2	0.38	2.40	55	0.533	Zona de agua
227-336	0.417	15-19	1, 2, 2	0.16	1.45	19	0.661	Zona de agua
568-582	0.360	24-40	1, 2, 2	0.32	2.09	40	0.635	Zona de agua
620-656	0.457	22-29	1, 2, 2	0.31	2.04	29	0.581	Zona de agua

Cálculos promedio de Saturación de Agua de Formación.

La resistividad del agua inferida de los gráficos de Pickett se observa decrecer con la profundidad, a excepción del intervalo 227-336 ft. que muestra una baja de los valores de resistividad bastante considerable respecto a los demás intervalos; esto puede deberse a un efecto litológico de la Formación, considerando que está compuesta principalmente por

conglomerados de textura clástica de tamaño grueso, correspondientes a cantos y guijos de gran variedad de rocas ígneas y metamórficas.

La temperatura registrada oscila entre 83.7 y 87 °F entre los intervalos más someros y más profundos, así que se tomará una temperatura promedio constante de 86 °F. Con base en esta temperatura y en los valores inferidos de resistividad, se puede estimar la concentración de cloruros o salinidad equivalente de la salmuera. Al realizar el cálculo para el intervalo más somero, resulta un valor de 1,850 ppm, y al repetirlo para el intervalo más profundo, arroja un valor de 3,200 ppm (ver la gráfica siguiente, cortesía de Schlumberger).

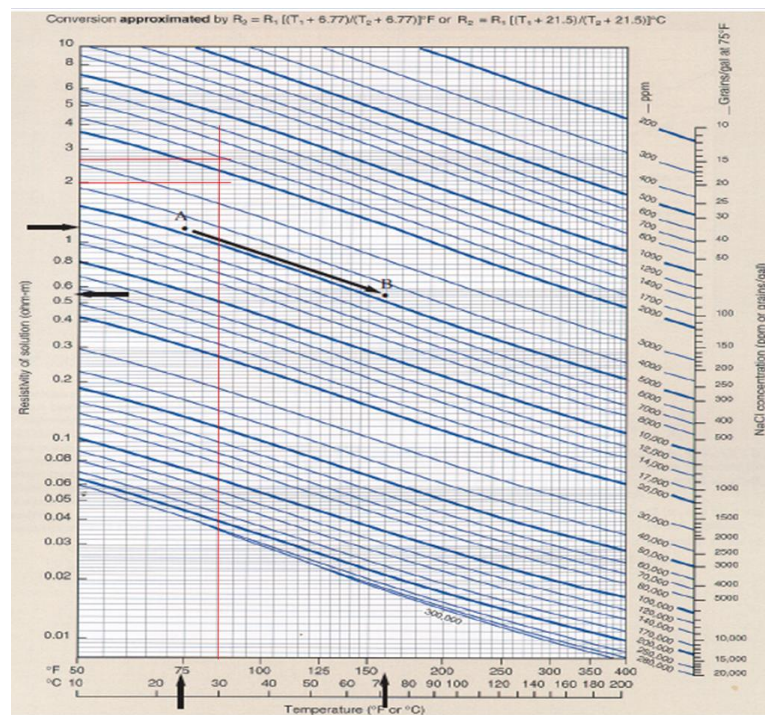


Figura 5-7 Tabla de concentración de NaCl-Resistividad/Temperatura, SLB.

La interpretación de fluidos arrojó que los intervalos 106-116, 182-195, 227-236, 568-582 y 620-656 corresponderían a zonas de agua. Sin embargo, el intervalo 182-195 presenta valores de Saturación de Agua (S_w) que van del 40% al 57% en el sub-intervalo 182-184,3. Considerando la incertidumbre en la resistividad del agua de Formación y otros parámetros de la ecuación de Archie, existe una posibilidad de que dicho intervalo contenga saturación de hidrocarburos. En tal caso debería ser petróleo, puesto que no se presenta la huella característica del gas en este intervalo. Se recomienda, por consiguiente, realizar

determinación de propiedades eléctricas de la Formación en estas unidades, y así acotar valores más probables de Saturación de agua (S_w).

Los intervalos prospectivos se centraron en el Grupo Real, desde los 106 a los 656 pies de profundidad. A partir de los 836 ft. de profundidad y hasta el final de la perforación del pozo, se detecta en los registros eléctricos zonas de alta radiactividad quizás asociadas a minerales pesados traza, originados en procesos de metamorfismo, las curvas de densidad y neutrón tienden a tomar posiciones opuestas, a su vez el Gamma Ray y la resistividad aumentan considerablemente hacia la parte basal, también la baja porosidad y los valores elevados de Factor Fotoeléctrico (PE) indican la presencia de rocas ígneas, tal y como puede observarse en la siguiente gráfica.

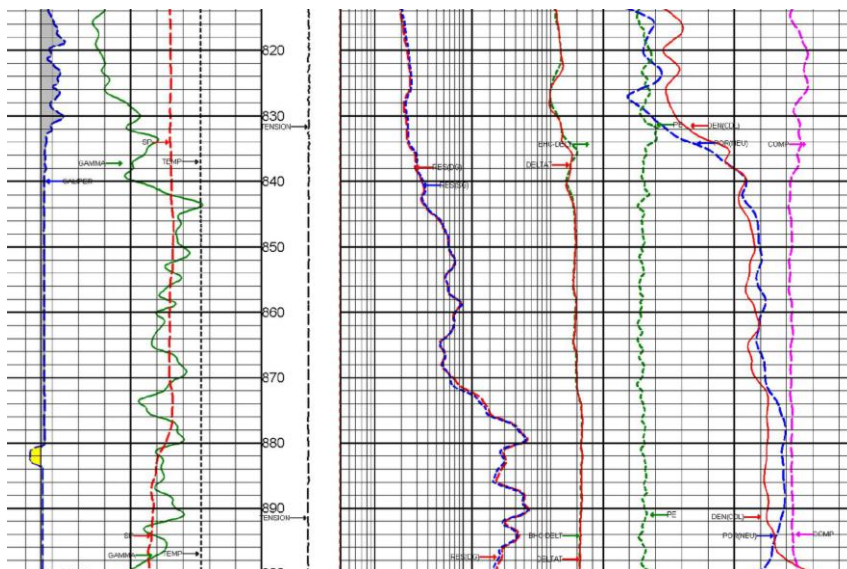


Figura 5-8 Registros eléctricos que muestran el cambio de litologías sedimentarias a ígneas volcano-sedimentarias (Complejo Real a Formación Noreán).

5.5 Estratigrafía de Facies Sísmicas

En el área de estudio se interpretaron las macrosecuencias de primer orden, correspondientes a las principales discordancias y formaciones geológicas de interés en el VMM, de acuerdo a la metodología planteada por Vail *et al.*, (1977), Mitchum *et al.*, y Widmier & Sangree (1977), donde, para la secuencia Cretácica, se identificaron hasta 5 sub-secuencias sísmicas (Figura 5-9). En general, se observa que las secuencias

depositacionales definen una sucesión discordante y discontinua con truncatura erosiva de tipo “Toplap” en dirección Noroeste, el cual se desfigura debido al “paralelismo” de los reflectores sísmicos. La correlación de edad para estas secuencias está basada en los datos palinológicos de los pozos utilizados en el estudio y a los análisis realizados por Tchegliakova, N. (1986), lo que permitió dar una base y sentido crono-estratigráfico al trabajo sismo-estratigráfico.

A continuación se presentan los resultados del análisis de facies sísmicas en la Fm. Umir.

5.5.1 Secuencia A

En esta línea sísmica, la sismofacies Toplap-Concordant/Subparallel (T-C/Subp), contiene localmente reflexiones de amplitudes moderadamente altas, discontinuas y moderadas a bajas frecuencias, que preliminarmente pueden estar coincidiendo con tenues cuerpos arenosos, sin embargo en su mayoría las reflexiones son de bajas amplitudes, discontinuas a caóticas y frecuencias bajas, que representarían cuerpos de materiales finos (Lutitas y Arcillolitas). Se detalla claramente el cambio lateral de las sismofacies, estas discontinuidades de los reflectores son indicadores de cambios de litologías de arenas a arcillas.

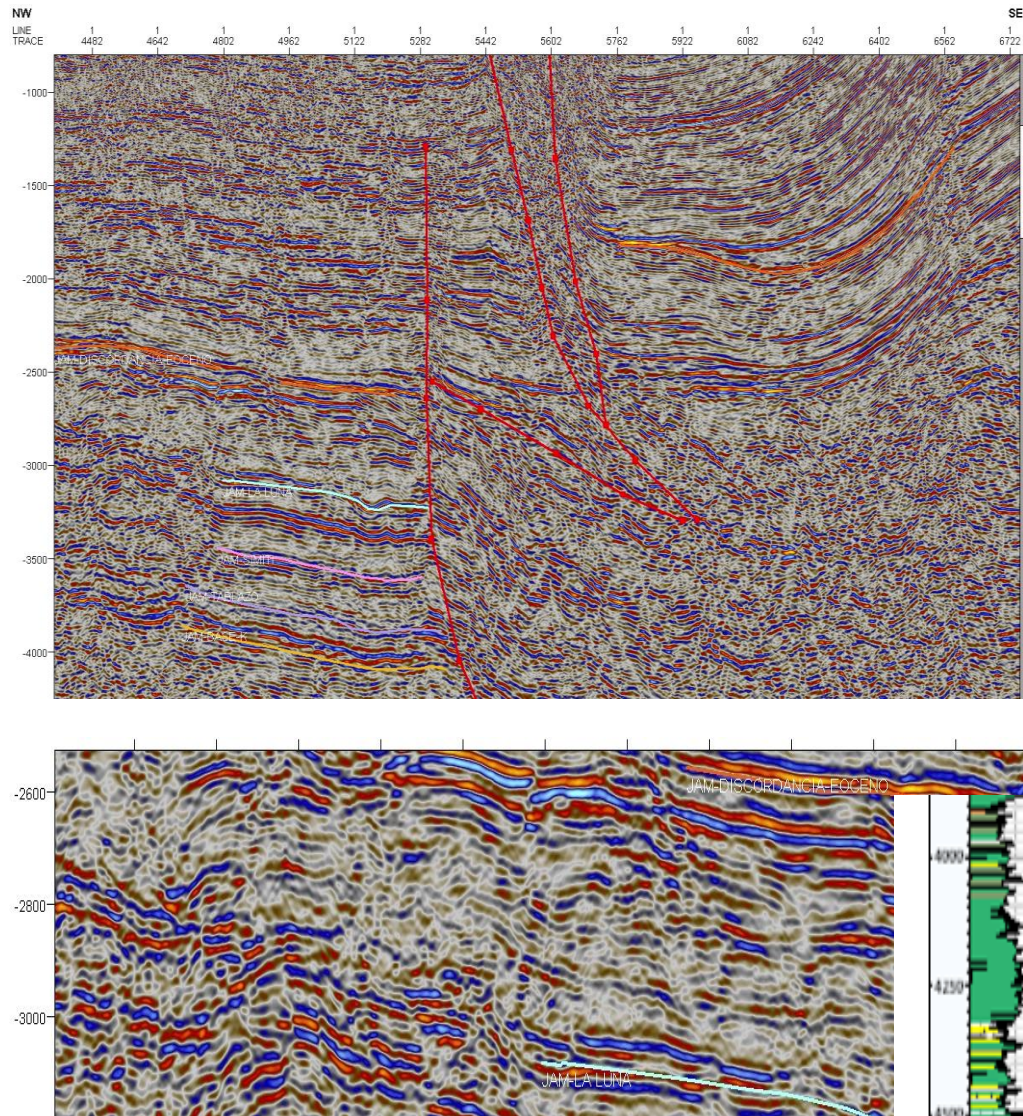


Figura 5-9 Sismofacies T-C/Subp identificada para la Secuencia A, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.

5.5.2 Secuencia B

En esta línea sísmica, la sismofacies Truncation-Concordant/Oblique (Tr-C/Ob), contiene reflexiones de amplitudes moderadamente bajas, continuas y frecuencias bajas, que indican la presencia de litologías finas intercaladas, ocasionalmente con cuerpos arenosos, ésta información es ratificada con los pozos que perforaron la Formación Umir en el VMM.

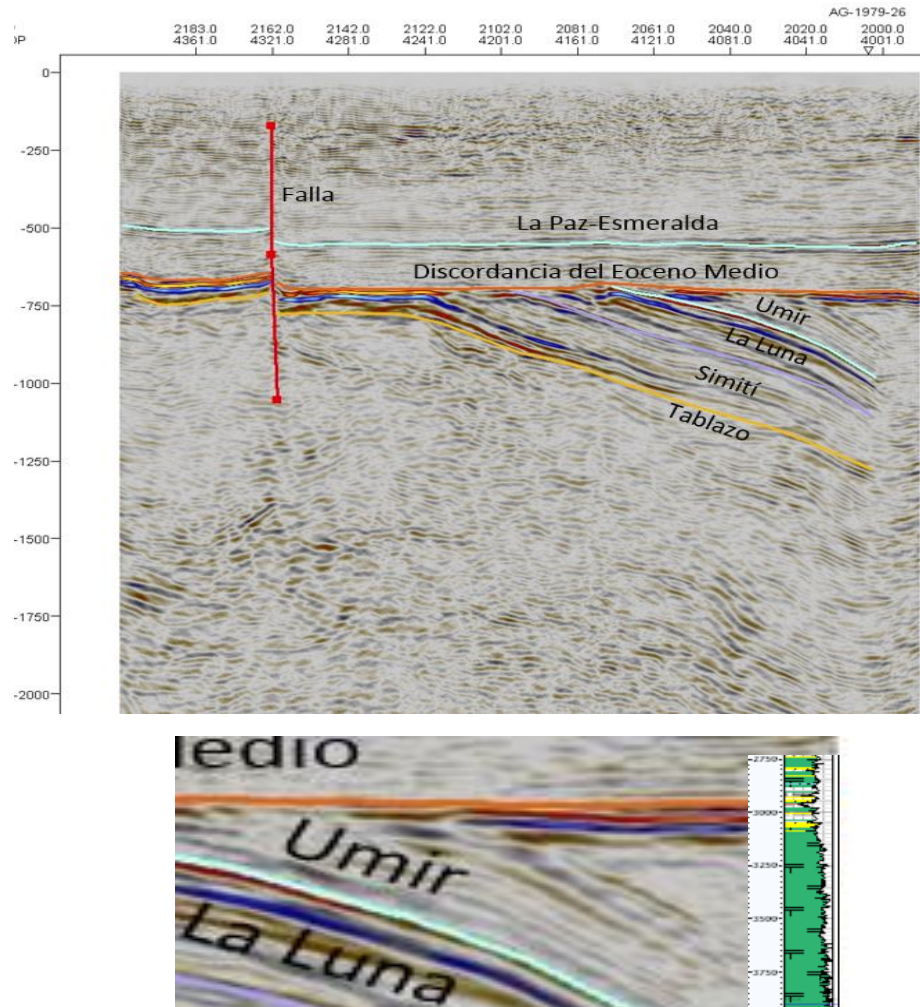


Figura 5-10 Sismofacies Tr-C/Ob identificada para la Secuencia B, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.

5.5.3 Secuencia C

En esta línea sísmica, la sismofacies Truncation-Concordant/Oblique (Tr-C/Ob), contiene reflexiones hacia el tope de amplitudes moderadamente altas, discontinuas y de frecuencias moderadamente bajas, hace referencia a paquetes de litologías arenosas intercaladas con niveles finos. Hacia la base las reflexiones presentan amplitudes bajas, discontinuas a caóticas, con bajas frecuencias que representan litologías finas.

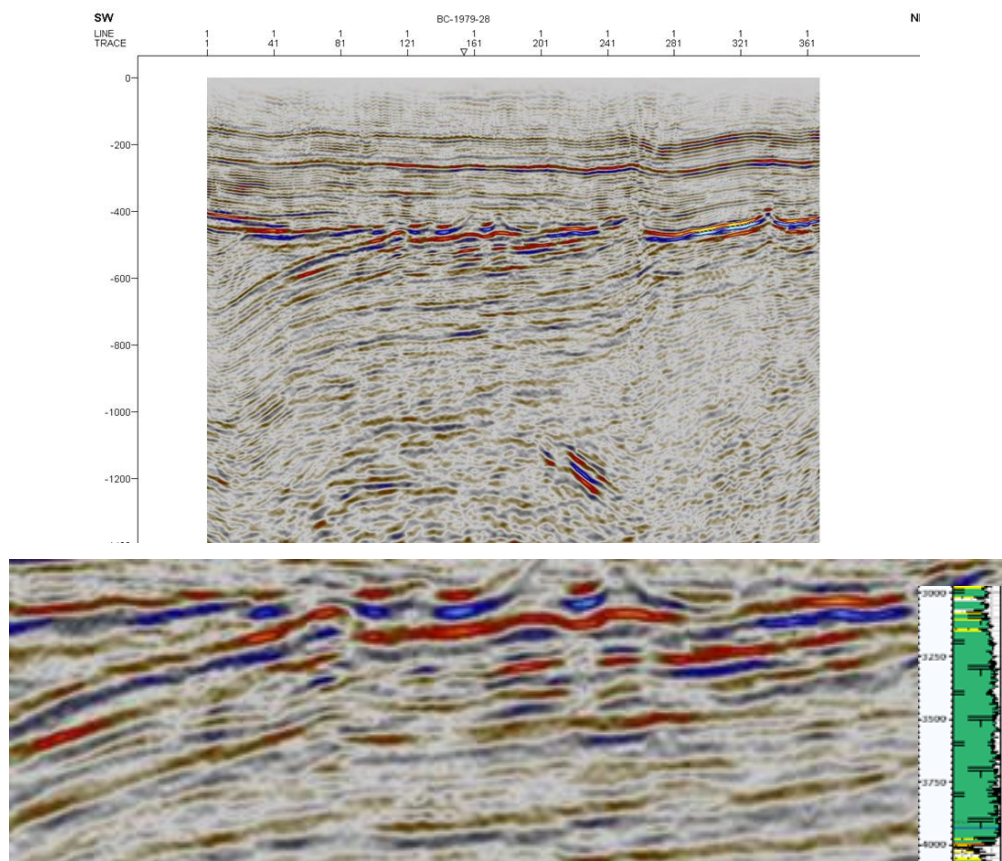


Figura 5-11 Sismofacies Tr-C/Ob identificada para la Secuencia C, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.

5.6 Integración y Análisis de Resultados

Finalmente, la integración y los análisis de resultados se desprenden de la investigación de los materiales, los recursos bibliográficos y del trabajo de los datos e información geológica y geofísica que estuvo disponible sobre la cuenca del Valle Medio del Magdalena, en el área de estudio.

La creación del proyecto geofísico sobre las plataformas petrotécnicas para el desarrollo de este estudio de maestría, requirió la carga y nivelación de la información de las secciones sísmicas al datum y velocidad de reemplazamiento del proyecto, el ajuste de la sísmica y de los pozos a través de tablas Tiempo-Profundidad (T-Z), la calibración de los registros eléctricos Sónicos (DT), la creación de sismogramas sintéticos y correcciones de shift y misties (correcciones en tiempo) para la correcta ubicación de los topes o límites de las formaciones geológicas de los pozos (estratigrafía). La construcción de transectas o compuestos sísmicos entre sísmica 2D/3D, amarradas a los pozos guía, la cual fue necesaria para la interpretación estructural (fallas) y de los principales reflectores sísmicos u horizontes, con los cuales se crearon las grillas y contornos que permitieron la reconstrucción de los mapas en el dominio del tiempo de las principales unidades litoestratigráficas y discordancias mesozoicas y cenozoicas, que se incluyeron en el modelado estructural (Structural Framework de Petrel), para la creación de zonas, capas y horizontes, entre otros. Para cumplir con el objetivo principal de esta investigación, fue necesario la construcción y edición de un modelo de velocidades para el sector de estudio en el VMM, que permitiera la conversión del dominio del tiempo al de profundidad (T-D) y obtener los mapas y superficies que a continuación se presentan.

5.6.1 Principales Horizontes Interpretados

Para la realización del modelo geológico y geofísico de la Formación Umir al norte del VMM, se tomaron como base y tope varias superficies, entre ellas la discordancia de la base del Cretácico (que incluye a la Formación La Luna), la Discordancia del Sub-Eoceno-medio, la Discordancia del Mioceno y la Discordancia del Oligoceno. Su construcción utilizó

la interpretación de fallas y de los horizontes de primera magnitud sobre las secciones sísmicas disponibles en la cuenca, para finalmente generar los mapas, a través de algoritmos de mapeo estructural (SGC, 2018-2019).

Mapa de la Base del Cretácico

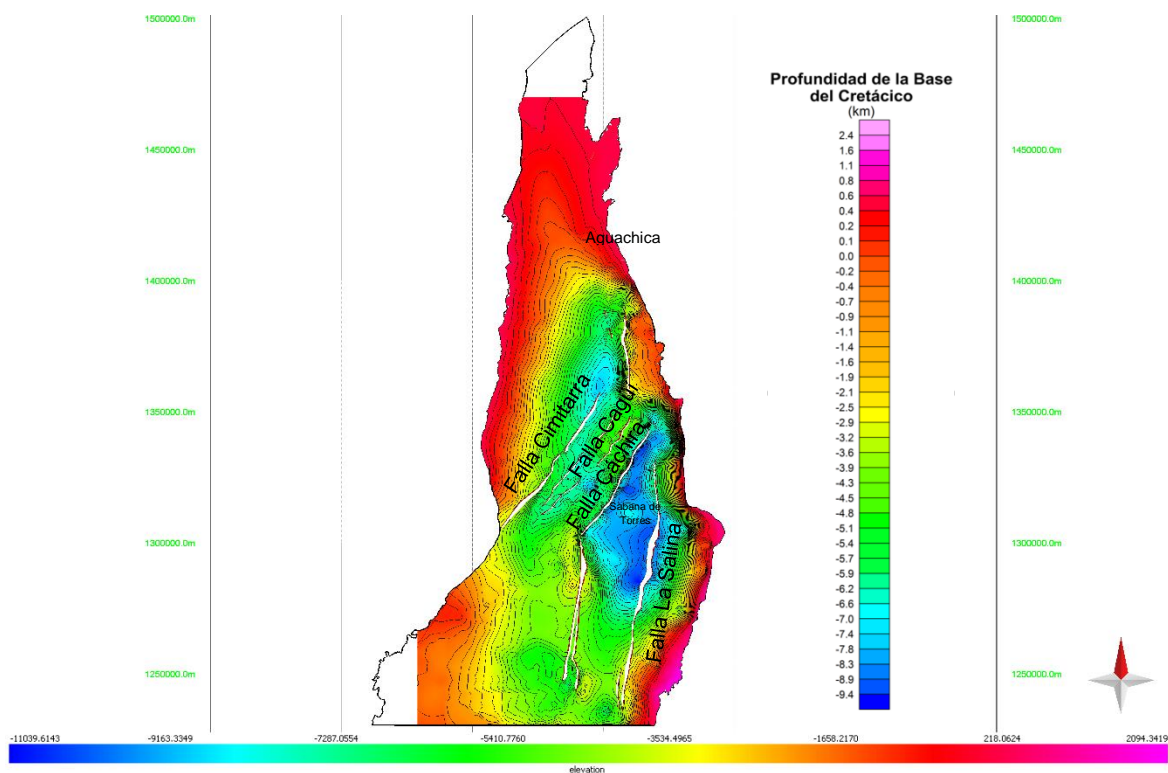


Figura 5-12 Mapa de profundidad base del Cretácico (SGC, modificado Mahan J., 2019).

Esta discordancia corresponde a una discontinuidad erosiva entre las columnas rocosas Jurásica y Cretácica (García, 2015). Esta superficie exhibe dos depocentros separados por un paleoalto creado por los Cabalgamientos de Cáchira y Cagüí, El depocentro sur está cortado por la falla que produjo el Cabalgamiento de La Salina, originando el Sinclinal de Nuevo Mundo. El depocentro occidental presenta un paleoalto que a su vez, lo subdivide en dos, haciendo el del sector sur más profundo y de menor extensión (ANH, 2015).

Mapa Formación La Luna

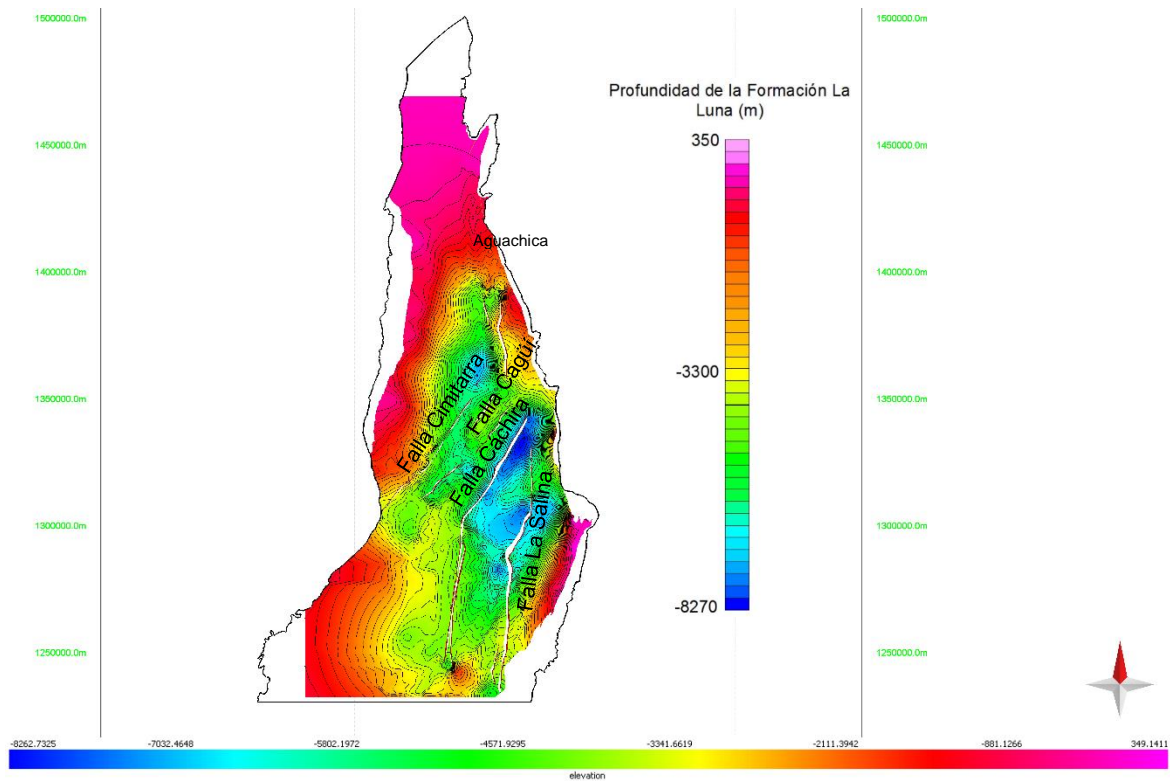


Figura 5-13 Mapa en profundidad Fm. La Luna (SGC, modificado por Mahan J., 2019).

Al igual que el anterior, se encuentran dos depocentros limitados por el paleoalto Jurásico producido por las fallas que generaron los cabalgamientos Cáchira y Cagüí, extendiéndose hasta el Sinclinal de Nuevo Mundo, donde es más superficial (SGC, 2016). En este mapa se evidencia la menor extensión del depocentro en el sector norte y la pérdida de expresión de la Falla de Cimitarra.

Mapa Formación Umir

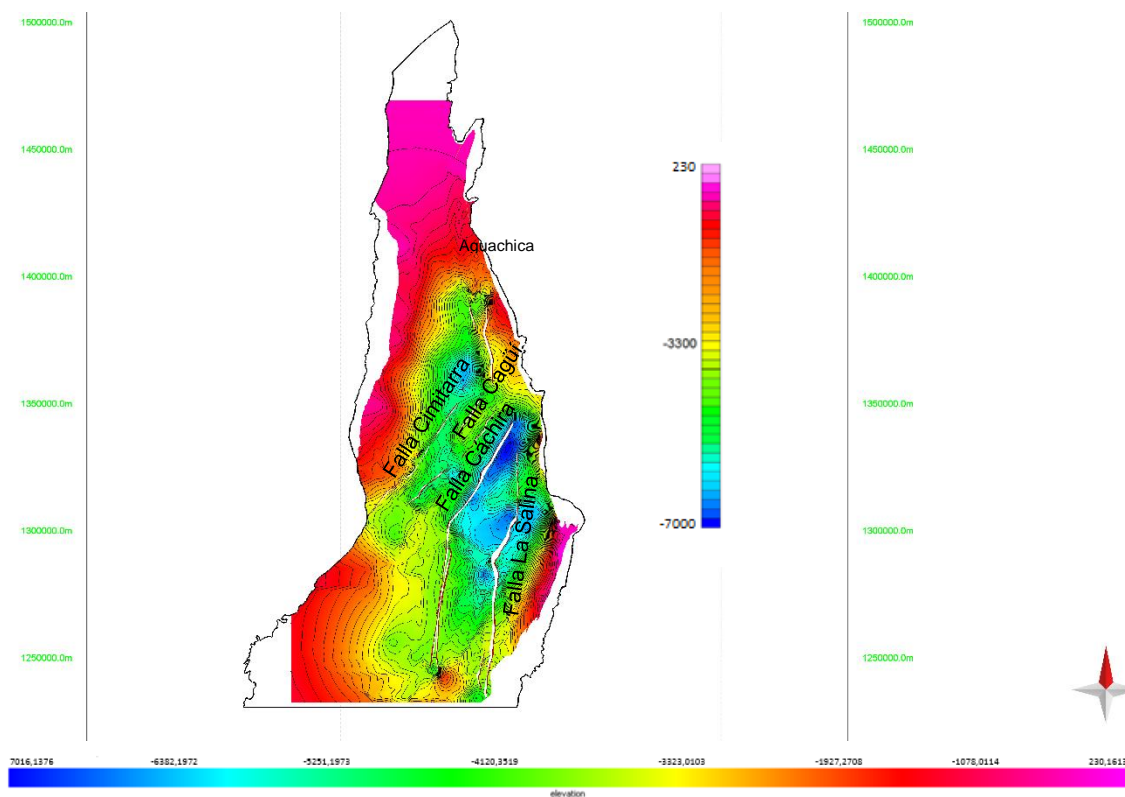


Figura 5-14 Mapa en profundidad Fm. Umir (SGC, modificado por Mahan J., 2019).

Como en la Formación La Luna, ambos depocentros están limitados por el paleoalto Jurásico que fue producido por las fallas que generaron los cabalgamientos Cáchira y Cagüí, extendiéndose también hasta el Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM), donde es más superficial (Mahan, 2019). Se observa el depocentro del sector norte, donde es más potente la columna litoestratigráfica, continúan presentes las fallas de Cimitarra, Cagüí, Cáchira y La Salina.

Mapa Discordancia Sub-Eoceno medio

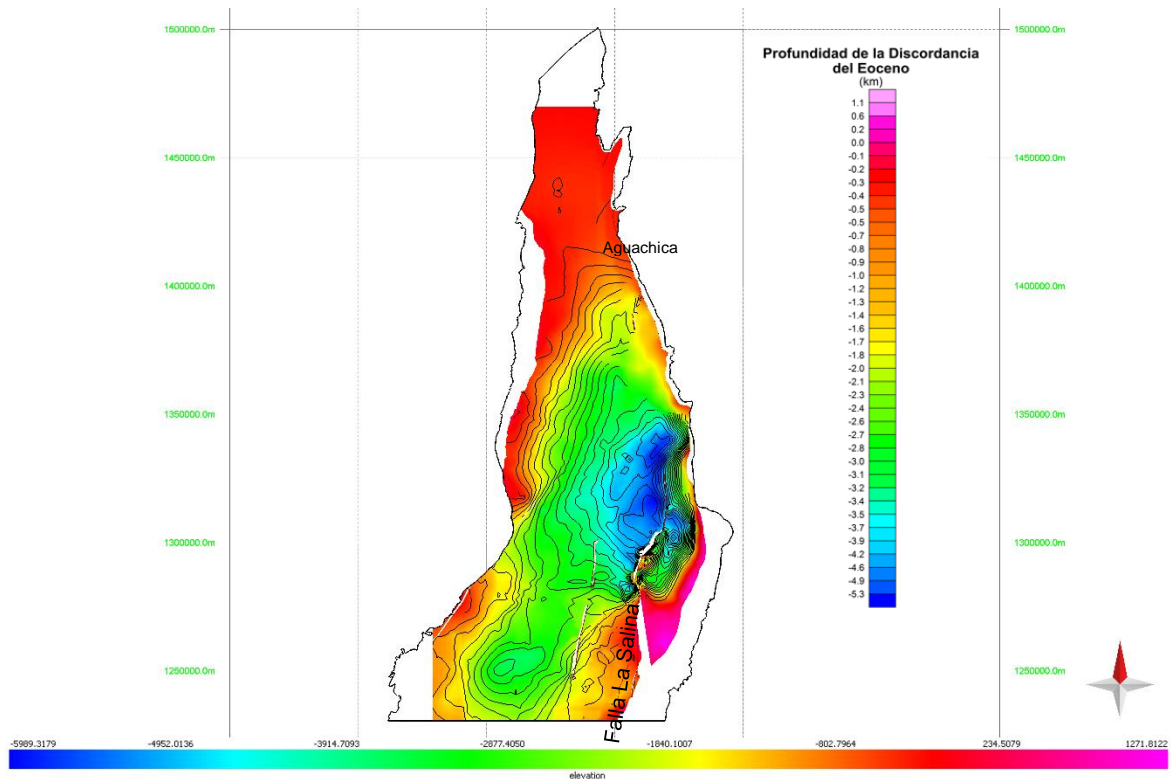


Figura 5-15 Mapa en profundidad Discordancia Sub-Eoceno medio (SGC, modificado por Mahan J., 2019). En este tiempo se conserva la expresión de la Faja La Salina.

Esta superficie es la representación de una superficie erosiva regional que deja un hiato en el Paleoceno. En este tiempo geológico, la erosión se encargó de modelar el paisaje, nivelando todos los pliegues (decapitando las geo-estructuras previas), este evento fue sucedido por la depositación de las formaciones Cenozoicas de La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado hasta los Grupos Real y Mesa (ANH, 2015).

Hacia el sector norte, la discordancia va somerizándose, produciendo una especie de acuñamiento con las discordancias suprayacentes (Oligoceno y Mioceno). La columna sedimentaria se pliega hacia el piedemonte oriental, pero al noroccidente no se presentan plegamientos, presentando en general, capas paralelas con acuñamiento al noroccidente de la cuenca hacia la Serranía de San Lucas.

Los plegamientos se deben básicamente a la reactivación e inversión de las fallas normales cretácicas, como consecuencia de la deformación compresiva que levantó la Cordillera Central y la Serranía de San Lucas (ANH-SGC, 2014).

Mapa Oligoceno

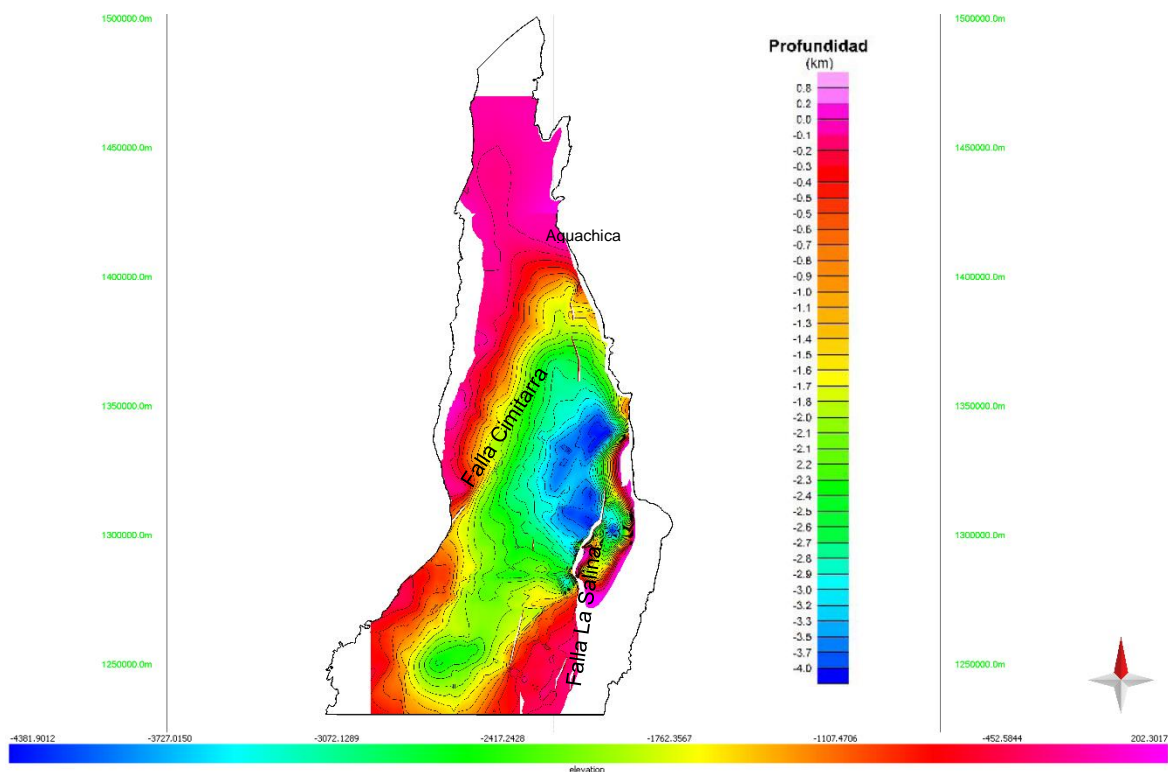


Figura 5-16 Mapa en profundidad del Oligoceno (SGC, modificado por Mahan J., 2019).

Esta superficie muestra la actividad tectónica ocurrida durante el Oligoceno, resaltan los dos depocentros divididos por el cabalgamiento de La Salina, cuyo sector norte es de mayor extensión. Este tiempo geológico fue tranquilo, permitiendo en casi toda la cuenca pendientes suaves con pocas variaciones laterales, excepto hacia el piedemonte de la Cordillera Oriental por las fallas de La Salina y Arrugas (ramificación de la falla La Salina). En esta superficie se encuentran plegamientos de tipo sinclinal-anticlinal, producidos por la reactivación de las fallas Cáchira y Cagüí, aunque no se presentan desplazamiento de horizontes posteriores a la discordancia del Eoceno (SGC, 2016).

Es de resaltar, que esta unidad se encuentra afectada en el sector occidental, por la Falla Cimitarra, la cual produce los plegamientos leves.

Mapa Discordancia Mioceno

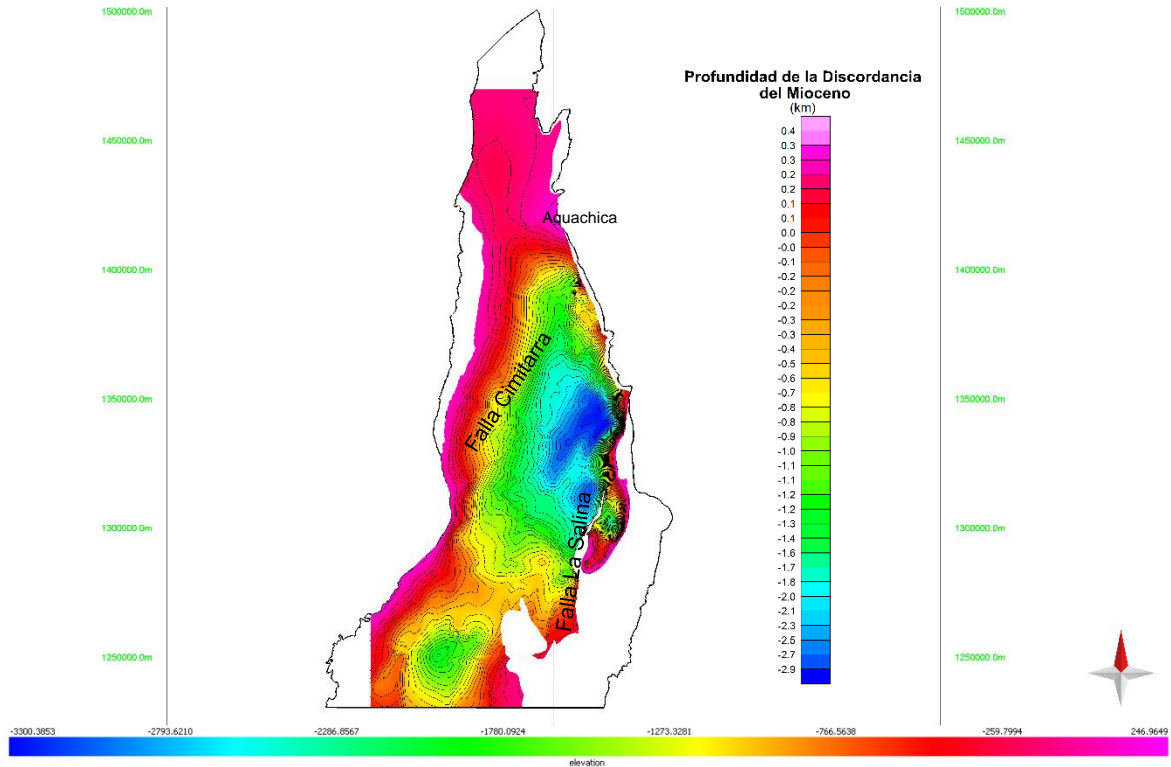


Figura 5-17 Mapa en profundidad del Mioceno (SGC, modificado por Mahan J., 2019).

Esta superficie discordante representa el límite entre las unidades litoestratigráficas del Oligoceno y el Mioceno, sobre la cual suprayacen los grupos Real y Mesa, que a su vez, presentan discordancias locales internas. Al igual que el mapa del Oligoceno, se presentan pendientes suaves, con pendientes de mayor inclinación hacia el piedemonte oriental, que es interrumpida y desplazada por el Cabalgamiento La salina (reactivación de fallas), la cual generó una cuenca de depositación.

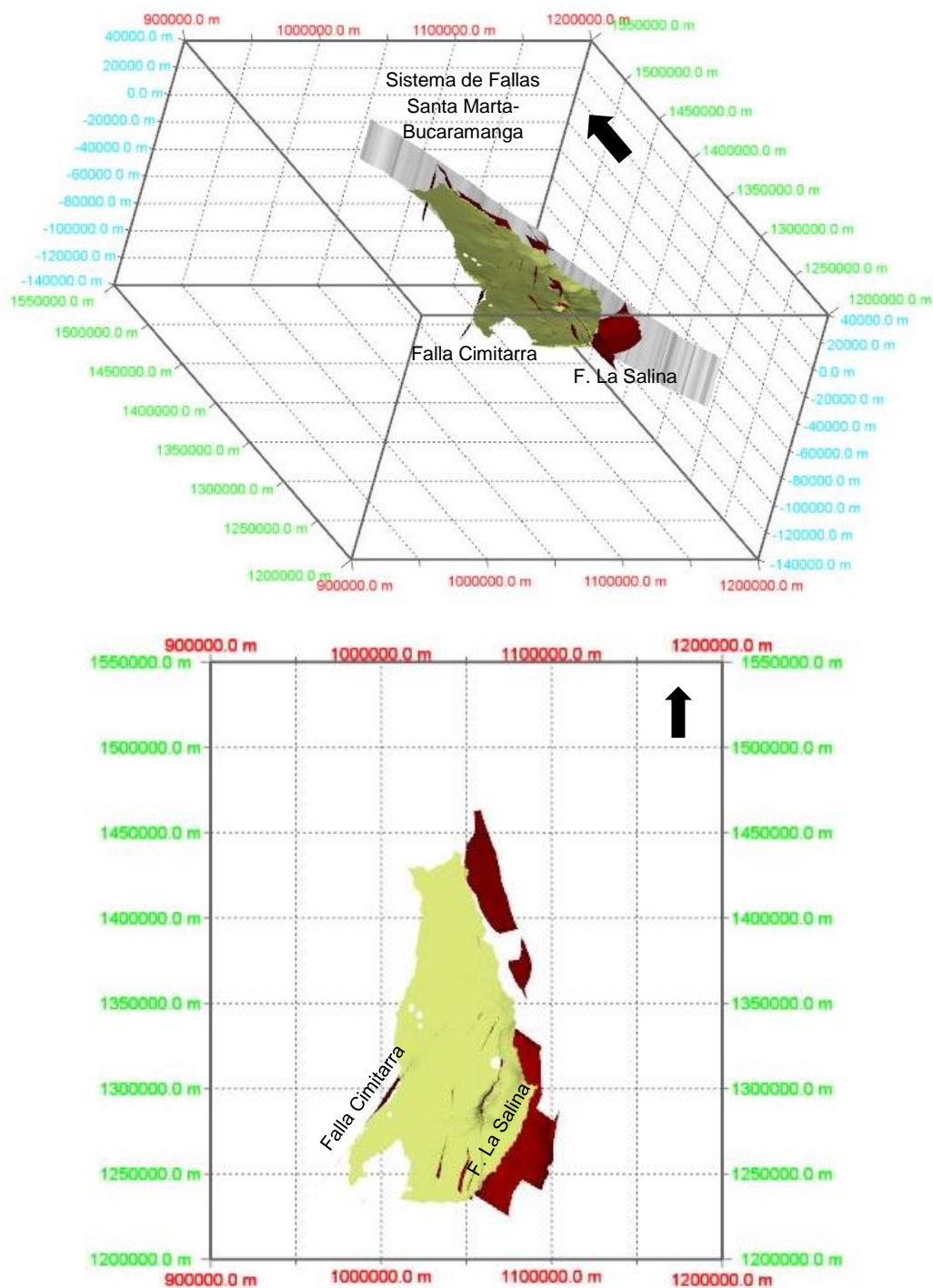


Figura 5-18 Modelo geológico tridimensional de las Formaciones Umir y La Luna con sus principales fallas en colores rojo y gris, puede apreciarse que la falla de La Salina es la que más afecta la discordancia del Eoceno medio (Elaboración propia).

6. Conclusiones

- Los métodos empleados en este trabajo de maestría, son válidos y aplicables a cualquier cuenca sedimentaria del mundo, establecer este flujo de trabajo, cuando se cuente con información sísmica/pozo, será útil en la identificación de intervalos prospectivos de hidrocarburos.
- Los análisis de estratigrafía sísmica y secuencial y la aplicación de atributos sísmicos, son de real importancia en áreas con poca o nula información de registros de pozo.
- Con la interpretación sísmica y los análisis de los marcadores de pozo, se logró evidenciar que el espesor de la Formación Umir en el Sector Centro – Norte del VMM, es mucho más considerable al compararlo con el espesor de la Formación la Luna, la cual ha sido calificada como la roca generadora por excelencia de la cuenca.
- Los análisis de materia orgánica y geoquímica orgánica, permitieron resaltar la importancia de la Formación Umir, respecto a La Luna en el sector centro norte del VMM, en cuanto a las condiciones para la prospección de yacimientos no convencionales de tipo aceite y gas en lutitas, mostrando excelentes registros de madurez termal y cantidad de materia orgánica.
- Se introduce una nueva metodología para el análisis petrofísico de los registros eléctricos de pozo, utilizando la ecuación de Archie y el gráfico de Pickett, que permite identificar con mayor certeza, los intervalos prospectivos para aceite y gas de los recursos convencionales y no convencionales, teniendo en cuenta que para el último, debe incorporarse la información de geoquímica y materia orgánica.
- A partir de las metodologías de estratigrafía de secuencias, se pueden resaltar los paquetes arcillosos y arenosos, también la continuidad lateral correspondiente a superficies de inundación y cambios de facies, las cuales resultan ser potenciales como rocas generadoras, como roca fuente y/o sello, resultando atractiva en el sistema petrolífero y para los recursos no convencionales existentes en la cuenca del VMM.

7.Recomendaciones

- Para la prospección de los yacimientos no convencionales es necesaria una evaluación integrada de las diferentes disciplinas de las geociencias (geología, geofísica, geoquímica, geomecánica, petrofísica) e ingeniería de yacimientos.
- Se recomienda realizar más análisis bioestratigráficos, de geoquímica y materia orgánica al norte del Sinclinal de Nuevo Mundo, en el sector centro norte del VMM (Sur del Departamento del Cesar), de tal forma que se aclaren las incertidumbres y que permitan desarrollar proyectos de beneficio de hidrocarburos convencionales y no convencionales.
- Se recomienda involucrar la información de los testigos o núcleos de pozo, así como los fluidos de hidrocarburos provenientes de los diversos campos y pozos del VMM en el área de estudio, para mejorar las descripciones estratigráficas y relaciones genéticas.
- Sería importante correlacionar los atributos sísmicos con las propiedades físicas medidas en los pozos del VMM.
- Es recomendable la creación de superficies de espesores de las unidades mesozoicas y cenozoicas, con la información obtenida de todos los pozos del Sector Centro - Norte del VMM.
- Finalmente se recomienda aplicar análisis petrofísico con el método de Archie y el gráfico de Pickett a todos los pozos del sector centro norte del VMM, para evaluar las mejores zonas prospectivas para los recursos hidrocarburíferos.

8. Anexos

1. Concordancia entre el Mapa de Gradiente geotérmico, el mapa de profundidad de basamento Cretácico y profundidad de sismicidad.

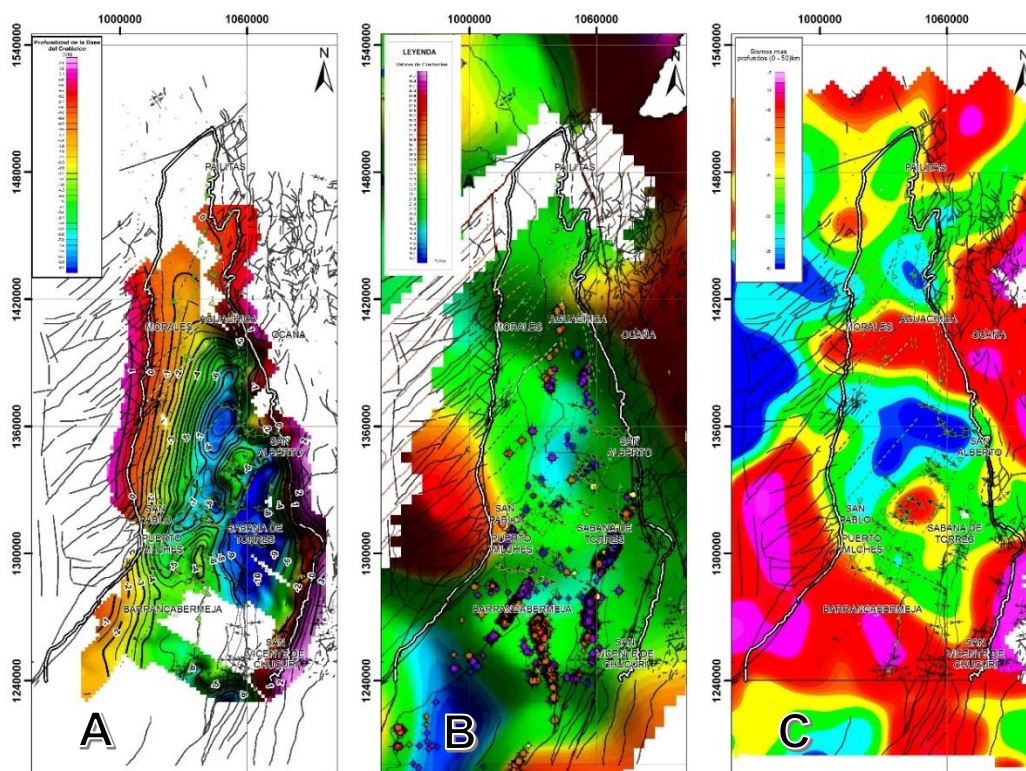


Figura 8-1 Superficies comparativas Mapa de la base del Cretácico (A), Gradiente Geotérmico (B) y Distribución de la profundidad de sismicidad (C). (SGC-ANH, 2008-2016).

El mapa de gradientes geotérmicos realizado por el Servicio Geológico Colombiano en 2008, muestra las variaciones en el VMM sector norte (Figura 5-10 B). Los valores máximos coinciden con la exposición de las rocas del basamento frente a la Cordillera Oriental y en el sector meridional de la Serranía de San Lucas, los gradientes intermedios y mínimos se localizan a lo largo del Valle Medio del Magdalena y se curva por debajo de la Serranía de San Lucas más al norte de la cuenca. El mapa de la figura (5-10 A), muestra como los altos del basamento hacia los bordes de la cuenca y en las zonas de presiones de la estructura de cabalgamiento de Cáchira, intensifican el flujo de calor, aumentando el gradiente geotérmico, mostrando similitudes con la superficie del basamento.

Una comparación de los anteriores mapas con el mapa de distribución de la profundidad de la sismicidad (Figura 5-10 C), muestra la similitud con las profundidades máximas de

los sismos, puede observarse que el gradiente geotérmico elevado del sur de la Serranía de San Lucas que se prolonga en dirección NW-SE con gradientes intermedios (Zona de Barrancabermeja), coincide con el área de mayor concentración de sismos de las profundidades someras e intermedias; mientras que el de los gradientes geotérmicos bajos se distribuyen a lo largo del eje del VMM, y el sector norte de la Serranía de San Lucas se relaciona con la ubicación de los sismos más profundos. En las figuras destaca igualmente, la coincidencia del alto de gradiente geotérmico de la zona Ocaña, Aguachica y Morales con la sismicidad somera intermedia (SGC, 2014). De acuerdo a un estudio de Ingeominas del año 2008, una posible interpretación a la relación inversa observada entre la profundidad, el número de microsismos y el gradiente geotérmico, es que el espesor de la capa sismogénica esté en función del estado térmico de la corteza por encima de factores tales como la presión de fluidos de poro, la velocidad de deformación o la litología, tal y como lo proponen Sibson (1986) y Scholtz (1989). Omuralieva et al. (2012) demostraron que en los arcos de isla de Japón, existe una variación considerable de la profundidad del D90 y que este umbral está gobernado por la variación espacial de las geotermas (Calvache et al, 2016). Ver Figura 2-3 del capítulo Modelo Tectónico.

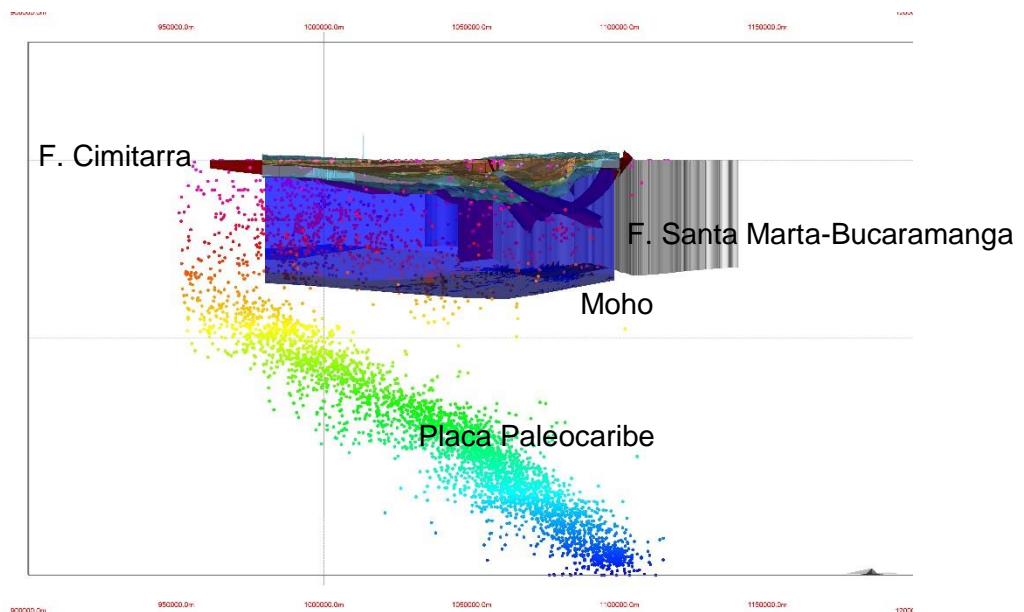


Figura 8-2 Modelo sismotectónico del VMM vista hacia el norte. Se observa la placa Paleocaribe y discontinuidad de Moho, cada división vertical equivale aproximadamente a 40 Km. y cada división horizontal a unos 150 Km. Fuente SGC, 2019.

2. Listado de pozos del VMM utilizados en este trabajo de maestría

Nombre Pozo	UWI	Coordenada X	Coordenada Y	Datum	Valor Datum	TD (TVDSS)	TD (MD)	Max inc.
ACACIA-1	ACAC0001	965090.46	1200861.73	KB	496.0	3082.0	3578.0	0.00
AGATA-1	AGAT0001	973312.62	1136154.51	KB	979.4	5221.6	6201.0	0.00
AGATA-1 ST 1	AGAT0001ST1	973312.62	1136154.51	KB	979.4	13604.6	14584.0	0.00
ANDES-1	ANDE0001	932496.46	1128433.49	KB	535.0	2540.0	3075.0	0.00
ANH VMM LA PISTA-1X	ANLP0001X	1044791.16	1489254.21	GL	211.77	1199.14	1199.14	0.00
ANITA-1	ANIT0001	990351.87	1260736.52	KB	342.0	2610.0	2952.0	0.00
ARCE-2	ARCE0001	966191.50	1209016.18	KB	364.0	2660.0	3024.0	0.00
ARRUGAS-1	ARRU0001	1046247.65	1241361.21	KB	580.8	7082.2	7663.0	0.00
BAJO_RIO-1	BRIO0001	1010733.42	1259652.22	KB	364.0	7657.0	8021.0	0.00
BAMBUCO-1	BAMU0001	999891.95	1251619.32	KB	292.9	7711.1	8004.0	0.00
BARBACOAS-1	BARB0001	984747.58	1233604.41	KB	417.0	5685.0	6102.0	0.00
BAUL-1	BAUL0007	948673.47	1183270.00	KB	431.1	1024.9	1456.0	0.00
BELLAVISTA-1	BELL0001	1055493.56	1277976.02	KB	378.0	10377.0	10755.0	0.00
BERLIN-2	BERL0001	1020194.96	1278816.28	KB	250.9	7011.1	7262.0	0.00
BRASSIA-1	BRAS0001	996193.05	1150294.82	KB	548.0	8822.0	9370.0	0.00
BRAVO-1	BRAO0001	1058268.25	1249574.22	KB	693.0	6232.0	6925.0	0.00
BRONCE-1	BRON0001	955002.41	1141643.32	KB	631.0	10399.0	11030.0	0.00
BUKHARA-1	BUKH0001	969393.50	1190982.72	KB	423.0	6266.0	6689.0	0.00
C2P-P1	C2PP0001	1032970.43	1263222.96	KB	327.0	2987.0	3314.0	0.00
CACERES-1	CACE0001	965256.81	1120745.48	KB	2618.0	5382.0	8000.0	0.00
CAIPAL-1	CAIP0001	956359.32	1169306.82	KB	530.0	5848.0	6378.0	0.00
CALDERON-1	CALR0001	959639.42	1167096.26	KB	497.0	7441.0	7938.0	0.00
CANO_MARIA-1	CMAR0001	1037862.27	1264596.62	KB	330.0	4366.0	4696.0	0.00
CANO_NEGRO-1	CNGR0001	1009678.65	1275781.01	KB	330.0	5104.0	5434.0	0.00
CANO_TABLAZO-1	CTAB0001	992905.68	1245770.46	KB	299.5	7392.5	7692.0	0.00
CANTIMPLORA-2	CANP0001	971672.59	1209837.27	KB	425.0	4213.0	4638.0	0.00
CAPOTE-1	CAPO0001	1017438.76	1223698.33	KB	500.0	12538.0	13038.0	0.00
CARARE-1	CRRR0001	997684.78	1237719.02	KB	303.0	10223.0	10526.0	0.00
CARDALES-1	CARD0001	1023843.35	1277931.73	KB	252.0	8474.0	8726.0	0.00
CARR-1	CARR0001	992881.37	1251890.46	KB	297.8	5147.2	5445.0	0.00
CASABE-1	CSBE0001	1018556.06	1270289.24	KB	256.8	7945.2	8202.0	0.00
CASCAJALES-1	CASL0001	1055986.50	1238708.72	KB	244.2	8195.8	8440.0	0.00
CASCATAL-1	CACT0001	981256.18	1185533.49	KB	288.0	13042.0	13330.0	0.00
CAYUMBA-1	CAYU0001	1049691.37	1290662.47	KB	304.0	13351.0	13655.0	0.00
CHICALA-1	CHIA0001	968314.94	1216452.26	KB	364.0	2416.0	2780.0	0.00
CHORREAMANTECA-1	CHOR0001	926953.49	1105914.32	KB	778.5	481.5	1260.0	0.00
CHUCURI-1	CHUB0001	1010143.05	1257426.72	KB	285.0	10300.0	10585.0	0.00
CIENAGA_CHUCURI-1	CIEA0001	1000929.29	1244111.20	KB	291.0	10083.0	10374.0	0.00
CIMITARRA-1	CIMI0001	1013251.28	1279943.72	KB	238.8	9263.2	9502.0	0.00
CINCUENTA-1	CINC0001	1036208.63	1246608.22	KB	331.0	7073.0	7404.0	0.00
CIRAMA-1	CIRM0001	1054128.21	1271627.92	KB	467.0	12383.0	12850.0	0.00
CIRCON-1	CIRC0001	947287.88	1145298.47	KB	555.5	5942.5	6498.0	0.00

Modelo Geológico-Geofísico de la Formación Umir y su Potencial de Generación de Hidrocarburos en la Región Norte del Valle Medio del Magdalena.

Nombre Pozo	UWI	Coordenada X	Coordenada Y	Datum	Valor Datum	TD (TVDSS)	TD (MD)	Max inc.
CISNE-1	CISN0001	934501.57	1136867.79	KB	499.1	2235.9	2735.0	0.00
COCODRILO-1	COCD0001	1001994.04	1249003.76	KB	278.3	8702.7	8981.0	0.00
COCORNA-1	COCO0001	942594.43	1160532.63	KB	465.0	2135.0	2600.0	0.00
COLORADO-1	COLO0001	1038448.99	1244073.04	KB	393.8	826.2	1220.0	0.00
CORAZON-1	CRZN0001	1062402.32	1292141.27	KB	500.0	7823.0	8323.0	0.00
CORCOVADO-1	CORC0001	978234.33	1180135.58	KB	594.0	12757.0	13351.0	0.00
DOS_HERMANOS-1	DOSH0001	971221.77	1171345.48	KB	643.6	11798.9	12442.5	0.00
EL_ROBLE-1	EROB0001	1009995.00	1283191.00	KB	285.9	8014.1	8300.0	0.00
EL_CERRO-1	ECER0001	1078492.51	1281654.51	KB	3524.0	7326.0	10850.0	0.00
EL_DORADO-1	EDOR0001	1042774.15	1294087.76	KB	308.4	10925.6	11234.0	0.00
ENCANTO-1	ENCA0001	984263.26	1229893.66	KB	368.0	6252.0	6620.0	0.00
ESCOCIA-2	ESCI0001	1026141.46	1205854.32	KB	706.0	7194.0	7900.0	0.00
ESPERANZA-1	ESRZ0001	1002591.93	1284314.92	KB	431.0	3647.0	4078.0	0.00
FORTUNA-1	FORN0001	983792.48	1181580.50	KB	856.0	9827.0	10683.0	0.00
FRESNO-1	FRES0001	966307.90	1217526.43	KB	375.0	1918.0	2293.0	0.00
FUEGO-1	FUEG0001	1040201.90	1237379.99	KB	508.0	3342.5	3850.5	0.00
GALA-1	GALA0001	1024024.09	1279841.62	KB	294.0	8216.5	8510.5	0.00
GALA-1X	GALA0001X	1023768.39	1280641.73	KB	251.2	7764.8	8016.0	0.00
GALEANDRA-1	GARA0001	961668.03	1163725.01	KB	495.4	9104.6	9600.0	0.00
GONGORA-1	GONG0001	950305.82	1146702.14	KB	513.6	7124.4	8273.0	30.37
GUACA-1	GUCA0001	931160.29	1111349.53	KB	714.4	4000.6	4715.0	0.00
GUANE-1	GUNA0001	1030330.57	1291911.86	KB	331.0	11719.0	12050.0	0.00
GUANEGRO-1	GUAE0001	956473.72	1130785.22	KB	643.0	13277.0	13920.0	0.00
GUARUMO-1	GUAR0001	1054723.33	1287635.62	KB	344.0	13284.0	13628.0	0.00
GUAYABITO-1	GUYB0001	1006612.26	1198852.10	KB	446.0	13167.0	13613.0	0.00
GUAYACAN-1	GUYC0001	1028264.72	1209282.15	KB	867.0	12274.0	13141.0	0.00
GUTIERREZ-1	GUTI0001	929802.46	1129754.26	KB	509.5	1165.5	1675.0	0.00
HELIOS-1	HELI0001	962972.62	1184375.14	KB	408.0	5521.0	5929.0	0.00
INFANTAS-1613	INFA0001	1034913.20	1250582.17	KB	407.3	1877.7	2285.0	0.00
LA_CEIBA-4	LACE0004	955544.64	1148683.20	KB	556.1	9533.9	10090.0	0.00
LA_CIRA-1625	CIRA1000	1034705.12	1265707.50	KB	356.6	3143.4	3500.0	0.00
LA_COQUERA-1	LACQ0001	1023602.78	1292831.29	KB	262.0	9053.0	9315.0	0.00
LA_FIEBRE-1	LAFI0001	966432.34	1144603.40	KB	805.0	12775.0	13580.0	0.00
LA_LINDA-1	LALI0001	976204.58	1198807.43	KB	469.0	8561.0	9030.0	0.00
LA_NEGRA-1	LANE0001	1036182.30	1249539.53	KB	379.9	4849.1	5229.0	0.00
LA_NUTRIA-1	LANU0001	960671.09	1174156.13	KB	515.0	6618.0	7133.0	0.00
LA_PUERTA-1	LAPU0001	1029087.50	1272785.97	KB	370.0	7200.0	7570.0	0.00
LA_ROMPIDA-1	LARO0001	1013255.61	1284984.91	KB	238.0	5352.0	5590.0	0.00
LA_SALINA-1	LSAL0001B	1061176.95	1295617.07	KB	507.0	2319.0	2826.0	0.00
LA_TOLDA-1	LTOL0001	980070.88	1215125.51	KB	383.0	7004.0	7387.0	0.00
LAS_FIERAS-1	LASF0001	1066591.49	1293618.10	KB	527.4	10480.6	11008.0	0.00
LAS_MONAS-4	LMON0001	1060993.08	1293774.09	KB	448.0	593.0	1041.0	0.00
LAS_PAVAS-1	LPAV0001	954104.47	1150410.41	KB	574.0	9055.0	9629.0	0.00

Nombre Pozo	UWI	Coordenada X	Coordenada Y	Datum	Valor Datum	TD (TVDS)	TD (MD)	Max inc.
LAUREL-1	LAUR0001	947572.53	1180680.31	KB	426.0	13061.0	13487.0	0.00
LILIA-1	LILI0001	1021854.63	1197775.04	KB	554.1	7428.9	7983.0	0.00
LISAMA-4	LISA0001	1058725.55	1281647.00	KB	508.5	4220.5	4729.0	0.00
LOMA_VIUDA-1	LOVI0001	942258.61	1100674.95	KB	1008.0	-706.0	302.0	0.00
LOMA-1	LOMA0001	1005595.52	1271031.92	KB	304.0	5200.0	5504.0	0.00
MARGARITAS-1	MARG0001	1047308.43	1278501.71	KB	337.3	10212.7	10550.0	0.00
MATACUYA-1	MATC0001	1030572.95	1291971.40	KB	298.7	8201.3	8500.0	0.00
MATADERO-1	MATD0001	948006.69	1148185.09	KB	567.0	6011.0	6578.0	0.00
MOJADA-1	MOJA0001	1039695.09	1236688.95	KB	476.6	5103.9	5580.5	0.00
MONTE_OSCURO-1	MOOS0001	979548.08	1181806.27	KB	581.6	5968.4	6550.0	0.00
MONTENEGRO-1	MNEG0001	976542.92	1239555.92	KB	335.0	1465.0	1800.0	0.00
MONTERREY-1	MREY0001	953572.25	1185517.17	KB	205.0	5013.9	5220.0	3.19
MONTOYAS A-1	MONO0001	1004142.82	1246905.54	KB	307.0	9943.0	10250.0	0.00
MORICHE-1	MORC0001	949246.79	1177045.63	KB	465.0	1959.0	2424.0	0.00
MORPHO-1	MORP0001	971716.03	1130797.62	KB	2814.3	3955.7	6770.0	0.00
MSW-1	MSWM0001	992406.16	1240398.12	KB	426.0	2523.0	2949.0	0.00
MUGROSA_SUR-1	MUGO0001	1040415.71	1221636.33	KB	573.0	4829.0	5402.0	0.00
NARE-1	NARE0001	946931.27	1178615.78	KB	520.0	692.0	1212.0	0.00
NUTRIA-1	NUTR0010	1058608.60	1266882.64	KB	515.0	8278.0	8793.0	0.00
OPON-1	OPON0001	1023320.86	1201254.91	KB	971.8	7888.3	8860.0	0.00
ORO_NEGRO-1	ORON0001	969109.37	1178186.75	KB	518.0	9166.0	9684.0	0.00
OTU-1	OTUU0001	947165.66	1154357.97	KB	481.0	4627.0	5108.0	0.00
PALMAS-1	PMAS0001	1038873.84	1230597.30	KB	508.0	10994.0	11502.0	0.00
PARAISO-1	PARI0001	929112.71	1118407.59	KB	513.0	2125.0	2638.0	0.00
PAYOA-25	PAYO0011	1065483.97	1296068.42	KB	462.6	9466.4	9929.0	0.00
PEDRAL-1	PEDR0001	1024962.57	1294962.45	KB	263.5	9046.5	9310.0	0.00
PENA_DE_ORO-1	PENA0001	1049805.46	1240857.38	KB	629.0	6283.0	6912.0	0.00
PENAS_BLANCAS-1	PBLA0001	1011287.20	1260890.64	KB	308.0	7887.0	8195.0	0.00
PERDIZ-1	PERZ0001	932882.23	1139674.53	KB	598.0	1329.0	1927.0	0.00
PEROLES-1	PERO0001	1055357.07	1258674.16	KB	364.0	8666.0	9030.0	0.00
PICO-1	PICO0001	1040082.96	1232001.19	KB	599.2	5260.8	5860.0	0.00
PRESIDIO-1	PRES0001	968004.95	1216299.48	KB	411.0	2351.0	2762.0	0.00
PUEBLO_CHUCURI-1	PUEB0001	1006467.87	1251509.16	KB	280.0	9614.0	9894.0	0.00
PUERTO_PARRA-1	PPAR0001	998951.45	1227130.90	KB	319.2	10610.8	10930.0	0.00
PUERTO_PINZON-1	PPIN0001	975040.66	1162932.42	KB	591.0	12290.0	12881.0	0.00
PUTANA-1	PUTA0001	1062355.65	1279201.12	KB	461.3	6562.2	7023.5	0.00
QUEBRADA_ROJA-1	QROJ0001	1042348.10	1279019.36	KB	457.5	9257.6	9715.0	0.00
REGALO-1	REGA0001	1058628.13	1252766.27	KB	829.9	8013.1	8843.0	0.00
RIO_LA_MIEL-1	RIOL0001	928963.48	1113187.65	KB	637.8	2978.2	3616.0	0.00
RIO_NEGRO-5	RNEG0001	943082.13	1123768.96	KB	567.0	8081.0	8648.0	0.00
RIO_SUCIO-1	RSUC0001	1070814.37	1282571.59	KB	608.0	8265.0	8873.0	0.00
SABALO-1K	SBAL0001K	1013140.88	1283028.96	KB	269.0	10029.0	10298.0	0.00
SAN_ANTONIO-1	SATN0001	940952.36	1099973.47	KB	1751.0	7845.0	9596.0	0.00
SAN_FERNANDO X-1	SFEN0001X	993465.81	1189701.74	KB	715.0	7712.0	8427.0	0.00

Nombre Pozo	UWI	Coordenada X	Coordenada Y	Datum	Valor Datum	TD (TVDSS)	TD (MD)	Max inc.
SAN_LUIS-12	SLUI0001	1050928.62	1240476.61	KB	651.0	1609.0	2260.0	0.00
SAN_RAFAEL-1	SRAF0001	1052358.22	1280308.33	KB	561.9	11852.1	12414.0	0.00
SAN_SILVESTRE-1	SSIL0001	1026760.80	1274619.53	KB	340.0	7777.0	8117.0	0.00
SANTA_ELENA-1	SELE0001	1060492.80	1279593.29	KB	670.0	13338.0	14008.0	0.00
SANTA_ROSA-1	SROS0001	1011227.22	1284895.86	KB	237.0	3033.0	3270.0	0.00
SANTAGUEDA-1	SGUE0001	928649.24	1118168.98	KB	637.0	2046.0	2683.0	0.00
SARDINATA-1	SARI0002	993671.99	1243436.05	KB	358.5	7198.5	7557.0	0.00
SOGAMOSO-1	SOGA0003	1041840.29	1295465.04	KB	395.0	11223.0	11618.0	0.00
SULLIVAN-1_TABATINGA-1	SULL0001	989910.05	1211313.66	KB	393.7	2290.3	2684.0	0.00
TECA-1	TECA0001	942348.62	1161107.05	KB	472.0	1866.0	2338.0	0.00
TEMPESTUOSA-1	TEMP0001	1058834.62	1259969.52	KB	1059.0	5981.0	7040.0	0.00
TENERIFE-1	TENE0001	1028705.55	1253472.66	KB	294.1	7623.9	7918.0	0.00
TESORO-1	TESO0001	1056888.58	1268708.89	KB	474.0	10353.0	10827.0	0.00
TIGRERA-1	TIGE0001	1018746.32	1281635.07	KB	254.0	6512.0	6766.0	0.00
TOMINEJO-1	TOMI0001	934697.04	1141574.64	KB	522.0	1785.0	2307.0	0.00
TOPAZ-1	TOPA0001	950289.19	1119708.90	KB	851.0	12334.0	13185.0	0.00
TOTUMO-1	TOTM0001	971544.42	1205635.89	KB	391.0	4657.0	5048.0	0.00
VELASQUEZ-1	VELA0001	954487.55	1153181.30	KB	530.0	7925.0	8455.0	0.00
VERACRUZ-1	VERA0001	980884.36	1207738.73	KB	394.0	8606.0	9000.0	0.00
VIZCAINA-1	VIZC0001	1027909.78	1243760.36	KB	439.0	10571.0	11010.0	0.00
YANACUE-10	YANA0010	1008958.90	1293382.63	KB	217.9	820.2	1038.0	0.00
YUMA-1	YUMA0001	1025025.24	1280500.17	KB	245.0	7914.0	8159.0	0.00
ZAHINO-1	ZAHI0001	986758.70	1238117.94	KB	330.7	6406.3	6737.0	0.00
ZAPAN-1	ZAPA0001	1004142.46	1247156.58	KB	304.3	9569.2	9873.5	0.00
ZARZAL-1	ZARZ0001	1040967.15	1273985.32	KB	311.6	7305.4	7617.0	0.00

Otros pozos utilizados al centro-norte del VMM

Pozo	Coordenada X (metros)	Coordenada Y (metros)	Md (pies)	Calidad de la Información
AGUAS CLARAS-5	1063182,35	1299037,07	8547	BUENA
BELLAVISTA-1	1055510,95	1277872,86	10755	BUENA
BELTRAN-1	926657,6	1025970,6	12520	BUENA
BRAVAL-3	1011441,1	1340332,25	922,8	BUENA
CASCATAL-1	980886,46	1185366,12	13330	BUENA
CORAZON-2	1062199,43	1291487,66	8500	BUENA

Informes y reportes finales de otros pozos utilizados en esta investigación

Aguachica-1, Alamo-1, Bandera-1, Buturama-2, Cacao-1, Cachira-1a, Caiman-1, Cascabela-1, Cayumba-1, Cocuyo-1, Cope-1, Crisol-1, Crisol-3, Helios-1, Mata-1, Morales-1, Muzanda-1, Norean-1, Pital-1, Preludio-1, Puntapietra-2, Reforma-1, Reposo-1, Reses-1, San Alberto-1, Tisquirama-1, Toca-1, Torcoroma-1, Totumal-1, Trigos-1.

3. Informe de espesores de las formaciones Mesozoicas y Cenozoicas del Sector Centro - Norte del VMM

Formación	T/E	Aguachica-1	Alamo-1	Bandera-1	buturama-2	Cacae-1	Calman-1	Cascabela-1	Cape-1	Cristol-1	Cristol-3	Labridja-9	Morales-1	Mormocoy-1	Muzando-1	Norcan-1	PITAL-1	PRELUDO-1	PUNTA PIEDRA-2	REPOSO-1	RESES-1	SAN ALBERTO-1	TSISQUIRAMA-1	TOCA-1	TOCORAMA-1	TOTUMAL-1	TRIGOS-1	
		X-1.052.331.211 Y-1.384.246.176 Z-2338	X-1.048.530.631 Y-1.396.004.631 Z-2337	X-1.047.0508 Y-1.454.0799 Z-2377	X-1.043.073.938 Y-1.453.303.228 Z-2377	X-1.056.483.136 Y-1.388.413.891 Z-2377	X-1.052.248.238 Y-1.378.388.97 Z-2331	X-1.052.423.088 Y-1.403.216.091 Z-2302	X-1.058.347.081 Y-1.394.647.138 Z-2302	X-1.044.623.538 Y-1.413.401.891 Z-2375	X-1.046.0758 Y-1.416.0508 Z-2390	X-1.039.033.338 Y-1.378.388.408 Z-2331	X-1.031.1338 Y-1.393.5008 Z-2336	X-1.037.9008 Y-1.392.7508 Z-2365	X-1.048.1008 Y-1.392.5508 Z-2365	X-1.043.9908 Y-1.416.0808 Z-2326	X-1.041.036.038 Y-1.413.057.076 Z-2465	X-1.046.240.138 Y-1.413.125.038 Z-2489	X-1.025.3888 Y-1.348.0778 Z-2226	X-1.041.617.808 Y-1.414.500.608 Z-2226	X-1.054.438.748 Y-1.383.337.038 Z-2477	X-1.053.467.308 Y-1.383.103.848 Z-2477	X-1.053.778.708 Y-1.383.142.038 Z-2355	X-1.067.290.688 Y-1.345.451.478 Z-2303	X-1.059.641.788 Y-1.366.989.388 Z-2378	X-1.052.021.038 Y-1.394.771.678 Z-2no disponible	X-1.040.880.188 Y-1.389.690.378 Z-2171	
Profundidad total		Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	Sup	
Grupo Real	Sup	7583	5232	2997	2383	5587	7178	4352	4894	2502	2994	1207	953	1790	6020	2274	2058	2882	7237	2075	5133	6910	6052	8963	5474	4347	2564	
Utama	Sup	7583	4178			8758	7871		4894			2910		8512							5133	6501	6052					
Colorado	Sup	9844	2783			3062	2902		291			1462		986	1198						3005	1794	2088					
	Sup	13124										1287		1964	8385													
	Sup	1348										2280		933	1412													
	Sup	37508										3588		1964	7502													
Magrosa	Sup	4208										1332		303	758													
	Sup	6402				2383	9832	10793	4352	4894																		
Unio	Sup	6402				1262	98	1211	886	2994																		
	Sup	2997				3945			5048	7888	2502	4044		3119		2548	2882											
La Luna	Sup	2133	1202			1498	575		1498	575		478	888		1462	1794	1332	780								5815	6736	5202
	Sup	3110	4850			6546			2972			4561				4334	4178	3640	10504							1468	FINAL	1202
Sanle	Sup	3290	788			987			987			1389				1548	884	948	10265									1384
Grupo de Acilolitas basal	Sup	4420	5768			7833	5788		7833	5788		5788				5480	5842	4488	11826	5320						7310		7633
	Sup	640	688			853			654	647		590				FINAL	653	662	FINAL	FINAL						323		639
	Sup	4420	5768			7833			7833			5788					5480	5842	4488									7633
Tabazo	Sup	62	122						617	74	82					140	77	82		FINAL	5105							147
Rosa Blanca A	Sup	4502	5880			7538			3952			5812				5620	5118	4576										7788
	Sup	234	185			210			210			108				230	220	324										135
	Sup	4720	6075			7710			5249			5020				5870	5348	4796										7935
Rosa Blanca B	Sup	254	257			275			256			200				FINAL	252	272										275
	Sup	4985	6332			8003			5095			6332					5607	5368										8210
Rosa Blanca C	Sup	89	304						96			200					93	82										82
	Sup	5060	6438			8094			5185			6330					5693	5200										8292
Tambor	Sup	20	7			77			20			20					77	18										18
	Sup	5090	6438			8387			5602			6348					5718	5368										8323
Grupo Giron	Sup			Final	Final				85			85					FINAL	FINAL							FINAL		FINAL	
	Sup					5875		7178				4812		2287														13006
La Paz	Sup					913		701						1388														755
	Sup																											2589
Emeraldas	Sup																											480

Bibliografía

1. Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH. Integración Geológica de la digitalización y Análisis de Núcleos, 2012.
2. Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH. Recursos de CBM en Colombia, Estimación del Potencial, 2012-2013.
3. Barrell, J. (1917). Rhythms and the measurements of geologic time. Geological Society of America Bulletin, 28, 745-904.
4. Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martínez, J. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2007.
5. Blandón, A., Caro L., Mendonça J., Hydrocarbon Generation Potential, from the La Luna and Umir Formations of Upper Cretaceous of Middle Magdalena Basin in Colombia. Program Topic: Petroleum geology, coal and organic petrology, and geochemistry, 2018.
6. Blandón, A., Potencial de Generación de Hidrocarburos de Muestras de las Formaciones La Luna y Umir en la Cuenca del Medio Magdalena, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2019.
7. Blandón, A., B. N. Giraldo. Aplicaciones de la Petrografía del Carbón y la Geoquímica Orgánica a la Exploración de Hidrocarburos en la Cuenca del Medio Magdalena: Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, Colombia, pp 243, 1989.
8. Bourgois, J., Calle, B., Tournon, J., and Toussaint, J. The Andean ophiolitic megastructures on the Buga Buenaventura transverse (Western Cordillera, Valle, Colombia). Tectonophysics, v. 82, 1982.
9. Calvache, M. Informes de la Red Sismológica Nacional, SGC, 2018.

10. Cao, S., Lerche, I., Hermanrud, C. Formation temperature estimation by inversion of borehole measurements. *Geophysics* 53 p 979-988, 1988.
11. Chopra, S., and K. J. Marfurt. Seismic Attribute for Prospect Identification and Reservoir Characterization: Society of Exploration Geophysicists Geophysical. Development Series No. 11, 464B, 2007.
12. Clavijo J. T. et al, Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas, Plancha 75 – Aguachica, 1992.
13. Clavijo J. T. et al, Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas, Mapa Geológico de Colombia, Memoria Explicativa de la Plancha 75 – Aguachica, escala 1:100.000, 1995.
14. Coletta, B., Herbard, F., Letouzey, J. Werner & Rudkiweicz, J. Tectonic Style and crustal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from balanced cross section, 1990.
15. Cooper, M. et al. Basin development and tectonic history of the Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia. *AAPG Bulletin* Vol. 79 pp. 1421 – 1443, 1995.
16. Córdoba, F., López, C., Rolón, L., Gómez, L., Buchelli, F., Sotelo, C. Proyecto de Evaluación Regional Cuenca Valle Medio del Magdalena – Cordillera Oriental, Colombia. Informe interno Ecopetrol, Bogotá, 2001.
17. Córdoba, F., Malagón, F., Valentín, D. Evaluación del potencial generador de hidrocarburos de las Formaciones Rosablanca, Paja y Tablazo, cuenca Valle Medio del Magdalena, Colombia. Informe interno Ecopetrol, Bogotá, 2001.
18. Dengo, C. A & Covey, M.C. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for traps styles and regional tectonics. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* Vol. 77, p. 1325-1337, 1993.
19. Dussán, M. Modelos 3D de facies de la Tectonosecuencia - 3 del Valle Medio del Magdalena (Colombia) aplicados a la predicción de reservorios. Ecopetrol S.A. Universitat de Barcelona. Máster de Geología, 2011.
20. Escalante, C. Integrated Seismic Stratigraphic and 1-D Basin Analysis of the Tayrona Depression–Offshore Baja Guajira Basin, Colombia. Tesis de Maestría. Oklahoma University, 2005.
21. Etayo - Serna, F., D. Barrero, H. Lozano, A. Espinosa, H. González, A. Urrego, I. Ballesteros, H. Forero, C. Ramírez, F. Zambrano, H. Duque, R. Vargas, A. Núñez, J. Álvarez, C. Ropain, E. Cardozo, N. Galvis, L. Sarmiento, J. Albers, J., Case, D. Singer, R. Bowen, B. Berger, D. Cox Y C. Hodges. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Ingeominas. Pub. Geol. Esp. No. 14-1, 1985.

22. Fabre, A. La Subsistencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario. Primera parte: Estudio Cuantitativo de la Subsistencia, Geología Norandina, V.8, p. 21-27, 1983.
23. Fabre, A. Tectonique et generation d'hydrocarbures; un modele de evolution de la Cordillere Orientale et du bassin des Llanos pendant le Cretace et le Tertiaire, Archive Science Geneve, v. 40, p. 145-190, 1987.
24. Gamba, N. Modelos 3D de facies de la Tectonosecuencia-2 del Valle Medio del Magdalena (Colombia) aplicados a la predicción de reservorios. Ecopetrol S.A. Universidad de Barcelona. Máster de Geología, 2011.
25. García, D., Parra, P. Áreas con Mayor Potencial de Carga de Petróleo: Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM) y Occidente de la Cordillera Oriental, Colombia. In: VIII Simposio Bolivariano, pp. 253-265, 2003.
26. García-Senz J. Estructura Geológica del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2015.
27. Guerrero Moreno, J. G., Eventos Tectónicos Pre-Andinos del Albiano al Eoceno en el Valle Medio del Magdalena y Situación del Costado Occidental de la Proto-Cordillera Oriental (Colombia). Tesis Doctoral en Ciencias de la Tierra. Universite Grenoble-Alpes y Universidad Nacional de Colombia, 2018.
28. Hantschel, T; Kauerauf, A. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Springer, 2009.
29. Instituto Colombiano del Petróleo, ICP. Temporalidad de la deformación en el Bloque Río Horta, Proyecto cronología de la deformación en cuencas sub-andinas. Ecopetrol Reporte Interno, 2011.
30. Karogodin, Y. N. (1975). Relaciones mutuas entre los complejos cíclicos sedimentares empujados de bacias contenido Petróleo y gas. Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 220(6), 1414-1416.
31. Laverde F., Sarmiento L., Suarez M., Cardozo E., Alfonso C., Navarro J., y Franco D., Play Fairway Analysis of Some Colombian Basins - Reservoir Controls and Geological Models. VEX, Ecopetrol S.A. Bogotá, 2003.
32. López, C. Modelos 3D de facies de la Tectonosecuencia-1 del Valle Medio del Magdalena (Colombia) aplicados a la predicción de reservorios. Ecopetrol S.A. Universidad de Barcelona. Máster de Geología, 2001.
33. Macellari C. Cretaceous Paleogeography and Depositional Cycles of Western South America. ESRI, University of South Carolina, Columbia, S.C. USA, 1988.

34. Mendoza, H. La Formación Cumbre - Modelo de transgresión marina rítmica, de comienzos del Cretácico. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo IX. 1-17 p. Bogotá, 1985.
35. Mitchum, R., Vail, P. & Thompson, S. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis: Memoir 26 Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1, 53-62, 1977.
36. Montaña Paola C. et al., Análisis de secuencias y procedencia en sucesiones sedimentarias de grano fino: un ejemplo de la Formación Umir y base de la Formación Lisama, en el sector de Simacota (Santander, Colombia), Boletín de Geología, Vol. 38, No. 1, enero - abril, 2016.
37. Morales, L., et al. General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin: 641 – 695. Tulsa, 1958.
38. Nichols, G. Sedimentology and Stratigraphy. Wiley-Blackwell Blackwell 2nd. Edition, 2009.
39. Öz Yilmaz. Seismic Data Analysis, Society of Exploration Geophysicists, 2001.
40. Posamentier, H.W. & Allen, G. P. Siliciclastic sequence stratigraphic patterns in foreland ramp-type basins. Geology, 21, 455-458, 1993.
41. Ramón J., Dzou, L., Giraldo, B. Geochemical evaluation of the Middle Magdalena Basin, Colombia. Ciencia Tecnología y Futuro 1 (3), 47-66, 1997.
42. Ramón J., Dzou, L. Petroleum geochemistry of the Middle Magdalena Valley, Colombia. Organic Geochemistry 30, 249-266, 1999.
43. Rangel A., Moldowan J. M., Niño C., Parra P., Giraldo B. N. Formación Umir: Evaluación de Geoquímica Orgánica y Estratigrafía, Como Fuente de Aceite Para la Cuenca del Magdalena Medio, Colombia. AAPG Boletín, V. 86, No. 12 pp 2069-2086, 2002.
44. Romero L. J. A., Muñoz O., Jerez S. Mapa Sismotectónico en el Sector Norte del Valle Medio del Magdalena, Geociencias Básicas, Servicio Geológico Colombiano - ANH, 2015.
45. Ruíz M. C. Caracterización Litoestratigráfica de la Formación La Luna Mediante Análisis de Multiatributos Sísmicos en la Prospección de Hidrocarburos No Convencionales. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2013.

46. Sangree, J. & Widmier, J. Seismic interpretation of clastic depositional facies: Memoir 26 Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. America Association of Petroleum Geologists Bulletin, 165-184, 1977.
47. Sarmiento, L.F. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models. Thesis Doctoral. Netherlands research, School of Sedimentary Geology, 2001.
48. Sarmiento G., Puentes J., Sierra C. Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. Geología Norandina, 2015.
49. Stifano, M., González, R., Anaya, S. J., Prince, X., Rojas, L. E., Rodríguez, I., Rubiano, J., López, J., Mahan, José A. Evaluación de la Prospectividad de un Play Estructural Profundo en el Terciario del Sector Centro - Sur de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, 2008.
50. Suárez, C. Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2016.
51. Suárez, M., Serrano, M. P., & Morales, M. Estilos estructurales y potencial de entrapamiento de la sección cretácea, cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos, Santafé de Bogotá, Colombia. Memorias Simposio Bolivariano – Caracas, 2000.
52. Taner, M. T., Schuelker, O., Doherty, R. & Baysal E. Seismic Attributes revised. SEG 64th Annual International Meeting. 1104-1106, 1994.
53. Taner, M. T. Seismic attributes. CSEG Recorder, pp. 48-56., 2001.
54. Tchegliakova, N. Los foraminíferos y los minerales antigénicos de la Formación Umir (sección Quebrada La Julia, Valle Medio del Magdalena): registro de laguna costera a finales del Cretácico Superior cuspidal (Maastrichtiano). Geología Colombiana: N° 19, pp 109-123, 1993.
55. Vail, P.R., Mitchum, Jr. R.M. & Thompson III, S. Seismic Stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal “onlap Memoir 26 Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. America Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1, 63–81, 1977.
56. Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. & Hardenbol, J. An overview of sequence stratigraphy and key definitions en: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. Sea Level Changes — An Integrated Approach. Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), 42, 39–45, 1988.

57. Vargas J. C., Nuevos Aportes a la Estimación del Potencial de Hidrocarburos en Colombia, Ciencias de la Tierra 33 (126), pp 17-43, 2009.
58. Villamizar F. J., Sismoestratigrafía del Oligoceno para el sector centro-oeste de la cuenca de los Llanos Orientales Municipio de Puerto Gaitán-Meta) Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
59. Zumberge, E. Z. Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia. Cities Service Research, Tulsa, Oklahoma, 1984.